ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Гаврилов Сергей Александрович

СИСТЕМЫ, ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва, 2025 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1 ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ БАЗОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ 20

1.1 Примеры комплексных систем диагностики пучка 21

1.2 Ток пучка 25

1.3 Поперечный профиль пучка 48

1.4 Поперечный эмиттанс пучка 83

1.5 Положение и фаза пучка 100

1.6 Продольная микроструктура пучка 117

1.7 Потери пучка 128

1.8 Выводы Главы 1 139

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И НАСТРОЙКА ОРИГИНАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ БАЗОВОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ ... 142

2.1 Измерители тока пучка 143

Индукционные датчики тока 143

Цилиндры Фарадея 160

2.2 Измерители поперечного профиля пучка 172

Проволочные сканеры 172

Многопроволочные профилометры 184

Ионизационные мониторы поперечного сечения 189

Флуоресцентные мониторы 196

2.3 Измерители поперечного эмиттанса пучка 204

Диафрагмированные измерители эмиттанса 204

Щелевые измерители эмиттанса 210

2.4 Измерители положения и фазы пучка 214

Полосковые датчики положения пучка 214

2.5 Измерители продольной микроструктуры пучка 251
Измеритель формы сгустков (фазовый анализатор)..... 251
2.6 Выводы Главы 2 271
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И НАСТРОЙКА ОРИГИНАЛЬНЫХ СИСТЕМ И МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ИОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СТЕНДОВ ОБЛУЧЕНИЯ 273
3.1 Системы диагностики пучков протонов, выведенных на воздух 275
3.2 Система диагностики пучков ионов водорода смешанных зарядностей..... 298
3.3 Выводы Главы 3 307
ГЛАВА 4 ОРИГИНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ 309
4.1 Неразрушающая диагностика разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения 309
4.2 Неразрушающая система аварийного контроля потерь пучка на основе индукционных датчиков тока 322
4.3 Выводы Главы 4 331
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 333
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 337
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 338

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

В настоящее время пучки ускоренных заряженных частиц находят всё более широкое применение, как в фундаментальных, так и в прикладных научных задачах, что приводит к сооружению новых и модернизации действующих многофункциональных исследовательских ускорительных комплексов. При этом во время настройки и эксплуатации ускорителей заряженных частиц решающую роль играют системы контроля и диагностики пучков, позволяющие обеспечить работу ускорителей с требуемыми параметрами.

Как показывает мировая практика, устройства и системы диагностики, разрабатываемые и устанавливаемые в крупных ускорительных комплексах, обычно разделены на две большие группы:

1. Отдельное узкоспециализированное оборудование для редких сложных измерений, используемое зачастую в единственном экземпляре на ускорителе, которое разрабатывается индивидуально под параметры конкретной машины, в том числе с привлечением исследовательских групп других ускорительных центров, специализирующихся в этой области.
2. Оборудование базовой системы диагностики основных параметров пучка, которое, как правило, поставляется в виде готовых устройств или систем вместе с необходимой электроникой, системами автоматизированного управления и специализированным программным обеспечением для проведения типовых измерений. Основными поставщиками данного оборудования за рубежом являются такие коммерческие компании, как Bergoz (Франция), Pantechnik (Франция), NTG (Германия), ITS (Южная Корея), Andesun (Китай), D-Pace (Канада) и другие фирмы, организованные действующими или бывшими сотрудниками тех или иных ускорительных центров для коммерциализации имеющихся у них разработок.

А в случае необходимости, поставка дополнительной электроники осуществляется такими крупными технологическими компаниями, как National Instruments (США), Dimtel (США), CAEN (Италия), Instrumentation Technologies (Словения), Advantech (Тайвань) и пр.

В России, на данный момент, полностью отсутствуют коммерчески доступные устройства диагностики пучков ускоренных заряженных частиц, при этом количество проектов по разработке и сооружению ускорителей постоянно увеличивается, а немногие действующие группы специалистов по диагностике пучка заняты в процессах обновления систем существующих машин для реализации задач по их дальнейшему развитию. Сложившаяся ситуация означает, что сооружение новых отечественных ускорительных комплексов фактически подразумевает либо покупку подобного оборудования у зарубежных производителей, либо индивидуальную разработку для каждого отдельного проекта, что может требовать нескольких лет дополнительного времени, так как в приборах диагностики пучка, как правило, задействован широкий набор разнообразных и зачастую взаимосвязанных физических процессов, требующих детального анализа, особенно в случае интенсивных пучков современных ускорителей, когда эксплуатация отдельных устройств диагностики ведется в режиме работы, близком к критическому, при котором наступает либо существенное искажение регистрируемого сигнала, либо разрушение детектирующей части датчика.

Таким образом, исследования и разработки приборов и методов контроля и диагностики пучков ускоренных заряженных частиц для ускорительных комплексов с последующим созданием опытных образцов не только универсальных устройств, предназначенных для широкого круга пользователей, но и специализированных приборов, позволяющих, в частности, обеспечить эффективную настройку и эксплуатацию сооружаемых в данный момент ускорительных комплексов, являются актуальной задачей физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники.

Цель работы

Настоящая диссертация посвящена созданию приборно-методической базы систем диагностики пучков для сооружаемых и проектируемых линейных резонансных ускорителей ионов, для чего решается три взаимосвязанных задачи:

1. Разработка обобщенных физико-технических принципов построения систем диагностики пучков в линейных ускорителях ионов для обоснования выбора состава систем и конфигурации отдельных диагностических приборов.
2. Разработка и изготовление универсальных конфигураций оборудования базовой диагностики пучков в линейных ускорителях ионов для аппаратного обеспечения сооружаемых и проектируемых установок.
3. Экспериментальные исследования параметров пучков на линейных ускорителях ионов, каналах транспортировки и исследовательских стендах. Разработка и реализация методик сбора и обработки диагностических данных.

Научная новизна

В ходе проведенных научно-исследовательских работ в рамках данной диссертации были получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан и экспериментально верифицирован для проведения вычислительных физических экспериментов комплекс трехмерных мультифизичных моделей оборудования диагностики пучков для линейных ускорителей ионов.
2. Разработана и реализована комплексная система диагностики пучков ионов водорода смешанных зарядностей, включая атомарные пучки, в широком диапазоне интенсивностей и энергий.
3. Разработан и реализован метод неразрушающей диагностики положения и тока разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения пучка.

4. Для измерителей продольной формы сгустков, работающих на основе поперечной высокочастотной модуляции вторичных низкоэнергетических электронов, разработан и реализован метод повышения фазового разрешения измерений до уровня, ограниченного дисперсией времени вылета электронов вторичной эмиссии, а также реализован метод расширения рабочего фазового диапазона измерений до полного периода следования анализируемых сгустков.

Практическая значимость работы

Достигнутые результаты работы использованы для модернизации системы диагностики пучков в ускорительном комплексе на основе сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН, благодаря чему была обеспечена настройка пучков с параметрами необходимыми как для достижения целей научной программы ИЯИ РАН, так и для выполнения обязательств в рамках соглашений с другими организациями. В том числе, в основе материалов диссертации лежат результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных в ИЯИ РАН по договорам с РФЯЦ-ВНИИЭФ, НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ «МИФИ», ОИЯИ, а также с зарубежными ускорительными центрами CERN (Швейцария), FAIR-GSI (Германия), ESS (Швеция), MYRRHA (Бельгия), FRIB MSU (США) на разработку, изготовление и поставку систем и отдельных устройств диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, действующих или сооружаемых в этих организациях.

Личный вклад автора

Все результаты диссертации получены автором лично, в частности:

- на основе детального анализа многочисленных взаимосвязанных физических процессов разработана физико-техническая концепция построения систем базовой диагностики пучков для линейных резонансных ускорителей ионов,
- разработана концепция системы диагностики и неразрушающей системы аварийного контроля потерь пучка сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA,

- разработаны численные физические модели и конфигурации устройств базовой диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, на основе которых обеспечено изготовление высокотехнологичного физического оборудования,
- разработаны численные физические модели и конфигурации устройств специализированной диагностики пучков для исследовательских стендов облучения, в том числе для пучков, выведенных на воздух,
- предложена и реализована методика разработки короткозамкнутых полосковых датчиков положения пучка,
- разработан и реализован метод неразрушающей диагностики положения и тока разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения пучка,
- разработан и реализован метод повышения фазовой разрешающей способности измерителей продольной формы сгустков, работающих на основе поперечной высокочастотной модуляции вторичных низкоэнергетических электронов,

либо в соавторстве, в случае которого вклад автора как главного разработчика используемого диагностического оборудования и непосредственного руководителя проводимых работ был определяющим, а именно:

- на основе результатов вычислительных экспериментов, а также конструкторских и технологических решений автора изготовлены, собраны и настроены системы и отдельные приборы диагностики ионных пучков с высокими эксплуатационными характеристиками,
- проведены экспериментальные исследования параметров пучков на отечественных и зарубежных линейных ускорителях ионов, каналах транспортировки и исследовательских стендах с использованием разработанного автором оборудования диагностики,
- на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН обеспечено проведение научных и прикладных исследований по облучению объектов пучками ионов с заданными параметрами в широком диапазоне интенсивностей и энергий.

В 2021 г. за цикл работ «Разработка и создание нового класса устройств диагностики структуры сгустков пучка в линейных ускорителях ионов» автор вместе с А. В. Фещенко (ИЯИ РАН) и В. А. Гайдашом (ИЯИ РАН) был удостоен премии имени В. И. Векслера – научной награды, присуждаемой Российской академией наук за выдающиеся работы в области физики ускорителей.

Положения, выносимые на защиту

1. Физико-техническая концепция построения систем базовой диагностики пучков для линейных резонансных ускорителей ионов.
2. Концепция системы диагностики и результаты разработки и изготовления неразрушающей системы быстрого аварийного контроля потерь пучка сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA.
3. Комплекс трехмерных мультифизичных моделей оборудования диагностики пучков для линейных ускорителей ионов.
4. Результаты разработки, изготовления и настройки систем и приборов базовой диагностики пучков для линейных ускорителей ионов.
5. Система диагностики пучков ионов водорода смешанных зарядностей.
6. Система диагностики пучков протонов, выведенных на воздух, для исследовательских стендов.
7. Методика разработки короткозамкнутых полосковых датчиков положения пучка.
8. Метод неразрушающей диагностики положения и тока разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе электростатических ёмкостных датчиков положения пучка.
9. Метод повышения фазового разрешения и экспериментальная реализация метода расширения рабочего фазового диапазона измерителей продольной формы сгустков, работающих на основе поперечной высокочастотной модуляции вторичных низкоэнергетических электронов.
10. Результаты экспериментальных исследований, настройки и оптимизации параметров пучков на отечественных и зарубежных линейных ускорителях ионов, каналах транспортировки и исследовательских стендах.

Степень достоверности

Все представленные в работе результаты получены или подтверждены в ходе экспериментальных исследований на действующих отечественных и зарубежных линейных ускорителях ионов с последующим публичным обсуждением в профессиональном международном диагностическом сообществе и использованы как для практической разработки нового оборудования диагностики пучка, так и для настройки параметров пучков в существующих ускорителях.

Методология и методы исследования

Методология представленных автором исследований включает в себя:

1. Первичный качественный анализ взаимосвязанных физических процессов, выявление ключевых эффектов, аналитические расчеты и оценки.
2. Разработка моделей и проведение вычислительных физических экспериментов с использованием методов трехмерного мультифизичного моделирования в программных системах «COMSOL Multiphysics» и «ANSYS».
3. Разработка конструкторских и технологических решений на основе итеративного трехмерного автоматизированного проектирования в программной системе «Solidworks».
4. Изготовление и лабораторные испытания опытного образца.
5. Доработка опытного образца, коррекция параметров электроники.
6. Испытания изготовленного оборудования, измерения и настройка параметров пучка на действующем линейном ускорителе ионов.
7. Сбор и обработка экспериментальных данных с использованием программной среды разработки LabVIEW.

Связь с научными программами

Отдельные части данной работы выполнены в рамках следующих программ:

1. Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019-2027 годы.

2. Научная программа Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика».
3. Программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Апробация работы и публикации

Всего по теме диссертации опубликована 41 работа. Основные результаты диссертации изложены в 16 публикациях [1 – 16] в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе в 15 публикациях, индексируемых в международной базе цитирования Web of Science (Core Collection), а также в 25 работах [17 – 41], опубликованных в трудах международных конференций, индексируемых в международной базе цитирования Scopus:

1. Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2014, 2016, 2018, 2021).
2. International Beam Instrumentation Conference (IBIC 2017, 2018, 2024).
3. Linear Accelerator Conference (LINAC 2016).
4. International Particle Accelerator Conference (IPAC 2018).

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, содержащего 148 наименований, включая 41 работу автора.

Общий объем диссертации: 350 страниц, включая 283 рисунка и 16 таблиц.

Содержание работы

Во **Введении** излагаются актуальность и степень разработанности темы исследования; цель, научная новизна и практическая значимость работы; описывается личный вклад автора и перечисляются положения, выносимые на защиту; отражается степень достоверности, методология и методы проведенного исследования, а также указываются данные о связи с государственными научными программами, апробации работы и публикациях основных результатов диссертации.

В **Главе 1** сформулированы задачи и потребности в диагностике пучков в зависимости от типа, назначения и характеристик линейных ускорителей ионов, даны определения и типичные значения основных измеряемых параметров пучков, проведен анализ методов и средств диагностики и показан типичный выбор диагностических устройств, приведены описания их физических принципов работы и основных технических характеристик, особенности и примеры практической реализации, а также указаны опытно-аналитические обоснования их применимости для различных типов пучков, что в совокупности формирует согласованную физико-техническую концепцию построения систем базовой диагностики пучков для линейных ускорителей ионов с целью проведения следующих типов измерений:

1. Измерения тока: индукционный датчик тока и цилиндр Фарадея.
2. Разрушающие измерения поперечного профиля: двухпроволочный сканер, многопроволочный профилометр, люминесцентный экран.
3. Неразрушающие измерения поперечного профиля: ионизационный монитор поперечного сечения пучка, профилометр на основе свечения остаточного газа.
4. Измерения поперечного эмиттанса: электростатический, диафрагмированный, щелевой измерители эмиттанса.
5. Измерения продольной микроструктуры: измеритель формы сгустков.
6. Измерения положения и фазы: ёмкостные и полосковые датчики положения.
7. Измерения потерь: газовые ионизационные и пропорциональные камеры.

Представленная физико-техническая концепция была, в частности, использована для составления концепции системы диагностики пучка сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Applications) – компактного источника нейтронов для фундаментальных исследований, промышленных приложений и образовательных задач, разрабатываемого на основе ускорителя с проектными параметрами: энергия 13 МэВ, импульсный ток 100 мА, длительность импульса 100 мкс, частота следования импульсов 100 Гц.

Одной из основных проблем для диагностики пучка в данном ускорителе является значительная импульсная и средняя мощность пучка в совокупности с относительно низкой энергией, что существенно ограничивает выбор возможных диагностических приборов и методов. В связи с этим, было рекомендовано построение системы диагностики на основе устройств, использующих неразрушающие способы измерений. Индукционные датчики тока и полосковые датчики положения пучка для измерений положения, фазы и энергии пучка могут быть стационарно установлены вдоль ускорителя в количестве, достаточном для контроля прохождения пучка вдоль всей ускоряющей структуры. На выходе ускорителя регистрация положения и поперечного сечения пучка может быть проведена с помощью ионизационного монитора поперечного сечения. Для измерений профиля пучка на входе и выходе RFQ наиболее предпочтительными устройствами являются проволочные сканеры, обеспечивающие прецизионные измерения, результаты которых могут быть использованы как для настроечных процедур, так и для моделирования динамики пучка в ускорителе с помощью различных транспортных кодов.

С учетом значительной импульсной и средней мощности пучка представляется нецелесообразным использование цилиндров Фарадея, совмещающих функции поглотителя и измерителя тока высокоинтенсивного пучка в каналах транспортировки пучков средних и высоких энергий. Для корректных измерений в таких цилиндрах должно использоваться большое количество технологических решений, существенно увеличивающих их стоимость по сравнению с простой охлаждаемой ловушкой, рассчитанной на ту же мощность теплосъема. При этом охлаждаемый ЦФ может использоваться в качестве ловушки пучка номинальной интенсивности в канале транспортировки пучка низких энергий для предварительной настройки пучка перед ускорением в RFQ.

В случае конфигурации канала, не позволяющей разместить несколько отдельных диагностических устройств, предлагается разработка единого

компактного диагностического бокса, включающего в себя ИДТ, охлаждаемый ЦФ и проволочный сканер.

Измеритель эмиттанса и измеритель формы сгустков часто изготавливаются в единичных экземплярах и передвигаются вдоль ускорителя в составе отдельного диагностического стенда на протяжении всего процесса настройки новых секций. В качестве ловушки пучка для такого стенда может использоваться стационарный охлаждаемый ЦФ, конструкция которого существенно упрощена благодаря размещению системы охлаждения вне вакуума ионопровода.

В конце главы приведена схема предложенного размещения оборудования диагностики пучка вдоль линейного ускорителя протонов проекта DARIA.

В **Главе 2** описаны результаты работ в рамках нескольких договоров на поставку диагностических устройств и систем для линейных ускорителей ионов, как отечественных, так и зарубежных ускорительных центров, по которым были проведены разработка, изготовление и настройка оригинального оборудования базовой системы диагностики пучков для линейных ускорителей ионов на основе разработанной физико-технической концепции. Из всего многообразия существующего оборудования диагностики параметров пучка было предложено использовать устройства, практическая реализация которых возможна с учетом имеющегося или гарантированно достижимого уровня отечественных технологий:

1. Измерители тока пучка:
   - индукционные датчики тока на основе ферритовых сердечников,
   - охлаждаемые и неохлаждаемые цилиндры Фарадея.
2. Измерители поперечного профиля пучка:
   - двухпроволочные сканеры и многопроволочные профилометры,
   - ионизационные мониторы поперечного сечения,
   - флуоресцентные мониторы.
3. Измерители поперечного эмиттанса пучка:
   - диафрагмированные и щелевые измерители.

4. Измерители положения и фазы:
   - короткозамкнутые полосковые датчики положения пучка.
5. Измерители продольной микроструктуры пучка:
   - измеритель формы сгустков (фазовый анализатор).

При этом в процессе исследований для каждого типа устройств были проработаны следующие аспекты:

- предлагаемые варианты реализации устройства,
- конструктивные особенности,
- расчетно-модельные оценки рабочих характеристик,
- параметры электроники,
- итоговые эксплуатационные параметры,

а также проведены лабораторные и/или пучковые испытания с измерениями параметров пучков на действующих линейных ускорителях ионов, в ходе которых были подтверждены не только базовые методики измерений, но и апробированы новые методы, включая верификацию разработанных мультифизичных моделей устройств. В частности, для измерителей формы сгустков на основе поперечной ВЧ модуляции вторичных низкоэнергетических электронов было впервые экспериментально показано увеличение фазового диапазона измерений до полного периода следования сгустков, а также повышение разрешающей способности измерителей до уровня, ограниченного дисперсией времени вылета электронов вторичной эмиссии.

Результатом выполненных работ стали разработанные автором оригинальные конфигурации оборудования диагностики пучков, которые предназначены для широкого круга ускорителей и в совокупности фактически перекрывают весь диапазон параметров пучков в существующих и проектируемых линейных ускорителях ионов по типу частиц (от протонов и отрицательных ионов водорода до многозарядных тяжелых ионов), энергиям (от низкоэнергетических каналов транспортировки с энергиями пучка десятки кэВ до высокоэнергетичных участков на выходе современных ускорителей с энергиями ~ 1 ГэВ) и интенсивности,

позволяя проводить необходимые диагностические измерения и на сильноточных пучках для нейтронных источников, комплексов для наработки медицинских изотопов или протонной флэш-терапии, и на пучках низкой интенсивности, например, для конвенциональной протонной терапии или стендов облучения для исследований радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры.

В **Главе 3** описаны процессы разработки, изготовления и настройки оригинальных систем диагностики ионных пучков для стендов облучения на примере установок Ускорительного центра нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН на базе сильноточного линейного ускорителя протонов и отрицательных ионов водорода.

В частности, для стенда протонного облучения и комплекса протонной терапии, где пучки протонов выводятся на воздух, разработаны и реализованы системы диагностики интенсивности, положения и профиля пучка с использованием люминесцентных экранов и мультианодных газовых счётчиков в широком диапазоне интенсивностей от 10^6 до 10^{13} протонов в импульсе.

В ходе работ были построены численные физические модели процессов электрон-ионной и ион-ионной рекомбинации в газах, а также показана возможность предварительного расчета коэффициентов усиления счётчиков в ионизационном и пропорциональном режимах работы для составления требований к электронике. Отдельные проблемы, выявленные во время практической эксплуатации на выведенных пучках протонов, были устранены при разработке приборов с обновленной конфигурацией, позволяющей осуществлять диагностику в полном диапазоне токовых и пространственных характеристик пучка ЛУ ИЯИ РАН, в том числе для настройки и контроля пучков, используемых в исследованиях как конвенциональных, так и флэш-режимов протонной терапии онкологических заболеваний.

Также в ходе развития стенда облучения на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН был разработан комплекс устройств диагностики ключевых

параметров пучка для исследований по взаимодействию ускоренных пучков заряженных частиц с веществом. Отличительной чертой разработанной системы диагностики является возможность работы с пучками частиц в разных зарядовых состояниях, включая смесь зарядовых состояний, а также атомарные пучки H^0, во всём диапазоне энергий и интенсивностей пучков, подаваемых на стенд. Индукционный датчик тока и многопроволочный профилометр, установленные на входе в стенд, позволяют измерять ток и профили пучка частиц. На выходе стенда установлены цилиндры Фарадея, в которых для повышения точности и надёжности проводимых измерений реализован как набор классических методик для оптимизации их работы, так и нестандартные решения, например, датчики ореола пучка, позволяющие контролировать полное прохождение пучка в апертуру ЦФ и тем самым гарантировать корректность токовых измерений на длинных пролетных базах стенда без использования дополнительных профилометров. Также на входе одного из цилиндров установлен многоламельный профилометр на основе печатных плат, выполняющий функцию перезарядной мишени для возможности регистрации тока многозарядного пучка, образующегося на стенде в некоторых режимах облучения. Пучок смешанных зарядовых состояний полностью обдирается в пластинах профилометра до протонов, создающих сигнальный ток ЦФ, при этом сам профилометр позволяет регистрировать профиль многозарядного пучка. Для всех предложенных устройств разработан полный комплект электроники: предварительные усилители ЦФ и ИДТ, интеграторы и коммутаторы профилометров, датчиков ореола и многоанодных газовых счётчиков, источники напряжения смещения, а также платы контроля и управления нижнего уровня для считывания сигналов и ручного управления коэффициентами усиления, напряжениями смещения и сигналами калибровки.

Результатом выполненных работ стало приборно-методическое обеспечение научных и прикладных исследований по облучению объектов пучками ионов с заданными параметрами в широком диапазоне интенсивностей и энергий.

В Главе 4 описаны некоторые оригинальные системы и методы диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, связанные с опытом автора в проводке высокоинтенсивных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки Ускорительного центра ИЯИ РАН. Представленные результаты могут быть использованы при разработке и создании систем диагностики для других сильноточных линейных ускорителей ионов различного назначения, в том числе для создания компактных нейтронных источников.

В частности, предложен, разработан и реализован метод неразрушающей диагностики положения разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения пучка. Показано, что классические ёмкостные электростатические датчики с линейным разрезом могут служить в качестве многоцелевых средств диагностики разгруппированных пучков протонов, обеспечивая неразрушающие измерения положения и тока в широком диапазоне интенсивностей пучка.

Исследования, проведенные для пучка протонов в ИЯИ РАН, показывают, что при типичных параметрах пучка такие датчики позволяют измерять положение центра масс пучка с разрешением ~0.1 мм, что соответствует примерно 0.1% их апертуры. Поскольку отношение сигнал/шум ограничено общей ёмкостью детектора, необходимо использовать предварительный усилитель заряда, подключенный к датчику коротким кабелем. При этом калибровка датчика может быть выполнена с помощью кабеля произвольной длины, так как выходной сигнал такого усилителя не зависит от общей ёмкости детектора.

Возможность измерений тока пучка подтверждается и количественно описывается с помощью трехмерного моделирования. Разрешающая способность измерений тока определяется шумами электроники и составляет ~50 мкА. Относительная погрешность измерений тока составляет менее 3% и определяется в основном нелинейностями измеряемого сигнала из-за положения и размера пучка.

Для линейного ускорителя проекта DARIA была предложена, разработана и изготовлена так называемая система «Δ ИДТ» для контроля разности измеряемых

токов пучка при прохождении двух последовательно установленных индукционных датчиков тока, которая может быть использована для контроля потерь пучка с целью быстрой аварийной защиты сильноточного ускорителя.

Индукционные датчики традиционно обеспечивают эффективную диагностику амплитуды и длительности тока пучка в ускорителях. Однако использование дополнительной предусилительной и обрабатывающей электроники позволяет расширить их функциональные возможности. В частности, контроль разности токов реализован на основе сравнения интегрального заряда каждого импульса тока пучка, что повышает точность измерений в случае работы с импульсами тока сложной формы. Пользователю системы предоставлено на выбор несколько дискретных значений измеряемой разницы сигналов ИДТ: от 1% для номинального режима работы до 10% в случае перестройки рабочего режима ускорителя и проведения настроечных процедур. Для предотвращения ложных срабатываний системы от различных помех формирование итогового аварийного сигнала происходит после трех последовательных срабатываний схемы сравнения на частоте следования анализируемых импульсов тока пучка.

Пример представленной системы «Δ ИДТ» успешно используется на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН в качестве одной из основных быстрых аварийных блокировок. В частности, подобные пары индукционных датчиков были разработаны и установлены автором на выходе пучка из линейного ускорителя и входах пучков в нейтронные источники для контроля интегральных потерь пучка в протяженных каналах транспортировки исследовательского ускорительного центра.

В **Заключении** приводятся основные результаты исследования и выводы по итогам проведенных работ, а также выражаются благодарности тем, кто оказывал помощь и содействие в реализации целей и задач диссертации.

ГЛАВА 1
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ БАЗОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ

В начале своего развития ускорители настраивались и контролировались вручную и визуально с использованием простейших измерителей тока и люминесцентных экранов, однако специализированные системы диагностики пучка (СДП), развивавшиеся параллельно с электроникой и материаловедением, компьютерными технологиями и системами сбора данных, быстро стали неотъемлемой частью любого ускорителя, превратившись в своеобразный «орган чувств», показывающий свойства и поведение реального пучка в ускорителе. Сегодня сложно представить себе настройку и тем более оптимизацию параметров крупного ускорителя без использования систем диагностики, которые можно условно разделить на три типа, востребованных на любом ускорителе:

1. Надежные быстрые измерители, показывающие основные параметры пучка, используемые для быстрой проверки общей функциональности ускорителя. Данные устройства обычно не разрушают пучок, обеспечивая возможность непрерывного оперативного контроля, и представляют результаты измерений в виде одного числа или простого графика.
2. Оборудование, используемое для ежедневных проверок качества и стабильности параметров пучка, а также для измерений в процессе перестройки параметров ускорителя. Этот тип измерителей, как правило является возмущающим, но позволяет получать больше информации о пучке.
3. Сложное диагностическое оборудование, используемое для настройки новых режимов работы или новых компонентов ускоряющей структуры, а также для поиска решений по оптимизации и расширению функциональных возможностей машины. Такие устройства могут быть сложны в эксплуатации и полностью разрушать пучок на время измерений.

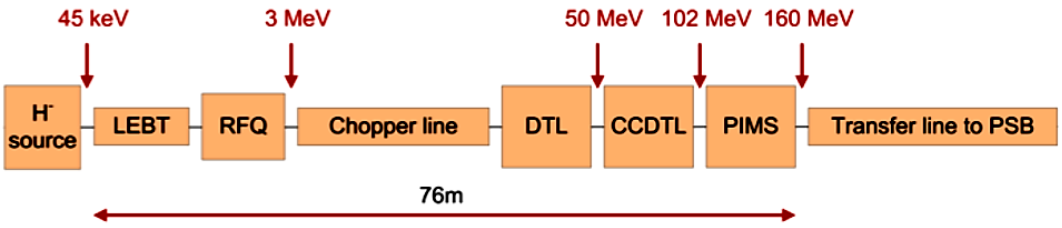
Очевидно, что между этими типами оборудования нет четких границ, тем не менее подобная классификация является весьма полезной, для того чтобы выстроить приоритеты при проектировании и конструировании произвольной системы диагностики, и в целом разработать физико-техническую концепцию построения систем диагностики пучка в линейных ускорителях ионов.

Общефизическая часть проведенного далее анализа, посвященная измеряемым параметрам пучка и базовым методам диагностики, выполнена с использование данных из обзоров [42-44] и трудов специализированных школ, проводимых ведущими ускорительными центрами [45-48]. Примеры комплексных систем диагностики и отдельных конкретных физико-технических решений представлены на основе статей и докладов на тематических конференциях по ускорительной физике [49, 50] и, в частности, по диагностике пучка, а также с использованием общедоступных технических проектов ускорительных комплексов [51-53].

1.1 Примеры комплексных систем диагностики пучка

Как правило, затраты на систему диагностики пучка составляют ~10% от общей стоимости ускорительного комплекса (без учета капитального строительства), при этом из-за сложности физико-технических аспектов и объема технологических решений число людей, вовлеченных в разработку, изготовление и дальнейшую эксплуатацию СДП, почти всегда превышает 10% от общего числа сотрудников ускорителя.

Состав СДП сильно зависит от параметров ускорителя и типа ускоряемого пучка, примеры распределения ключевых устройств диагностики на некоторых ускорительных комплексах приведены на рисунках 1.1.1–1.1.3.



Location	E [MeV]	BPM	BCT	SEM GRIDS	WS	BTV	BLM
Diagn. Bench	3-12 MeV	3	2	2H+1V	-	-	-
LEBT	0.045	-	1	2H+1V	-	-	-
MEBT	3	-	2	-	2	-	1
DTL	50	2	-	-	-	-	2
CCDTL	102	7	1	2H+2V	2	-	4
PIMS	160	6	1	2H+2V	2	-	3
TL to PSB	160	12	7	3H+3V		3	11
DL	160	-	1			1	-

Рисунок 1.1.1 – Распределение основных устройств диагностики ускорителя LINAC4 CERN (Швейцария), BPM – датчик положения пучка (пикап), BCT – индукционный датчик тока, SEM Grid – многопроволочный профилометр, WS – проволочный сканер, BTV – сцинтилляционный экран с видеокамерой, BLM – датчик потерь пучка

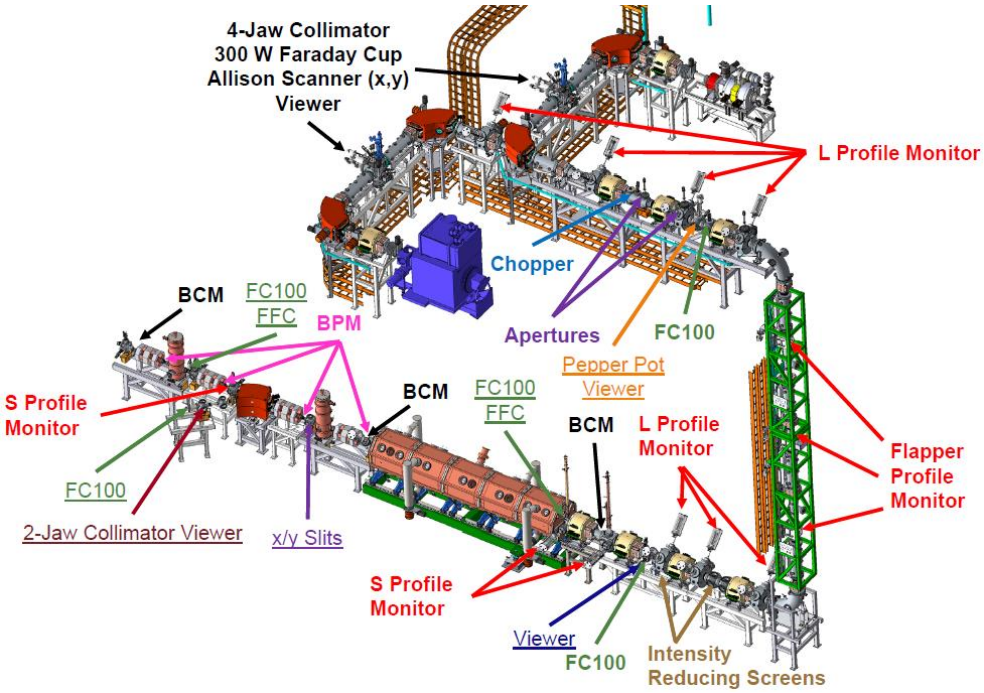


Рисунок 1.1.2 – Распределение основных устройств диагностики LEBT-канала ускорителя редких тяжелых ионов FRIB MSU (США)

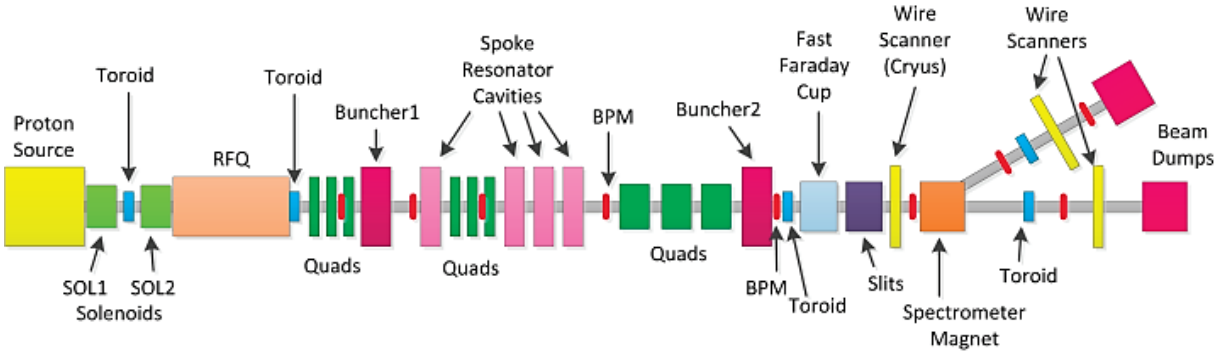


Рисунок 1.1.3 – Схема системы диагностики тестового канала высокоинтенсивного ускорителя протонов HINS Fermilab (США)

Также в общемировой практике принято использование отдельных диагностических стендов для поэтапной настройки ускорителя во время его ввода в эксплуатацию, впоследствии такие стенды сдвигаются в конец ускорителя и используются для оптимизации новых режимов работы, либо разбираются на отдельные компоненты, которые устанавливаются стационарно на ускорителе.

Примеры диагностических стендов показаны на рисунках 1.1.4–1.1.7.

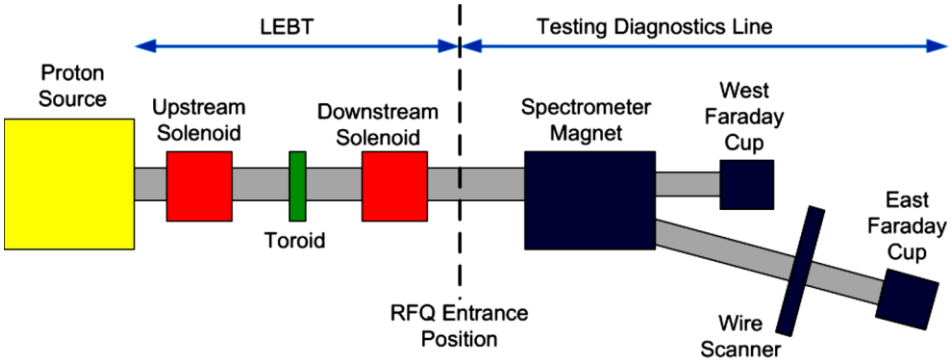


Рисунок 1.1.4 – Низкоэнергетический диагностический канал HINS Fermilab

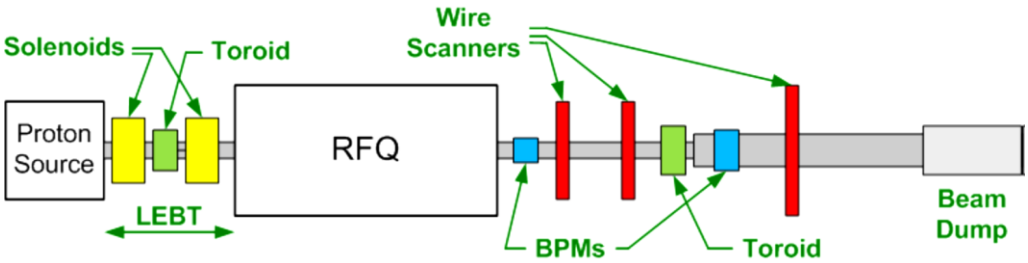


Рисунок 1.1.5 – Диагностический стенд HINS Fermilab для настройки RFQ

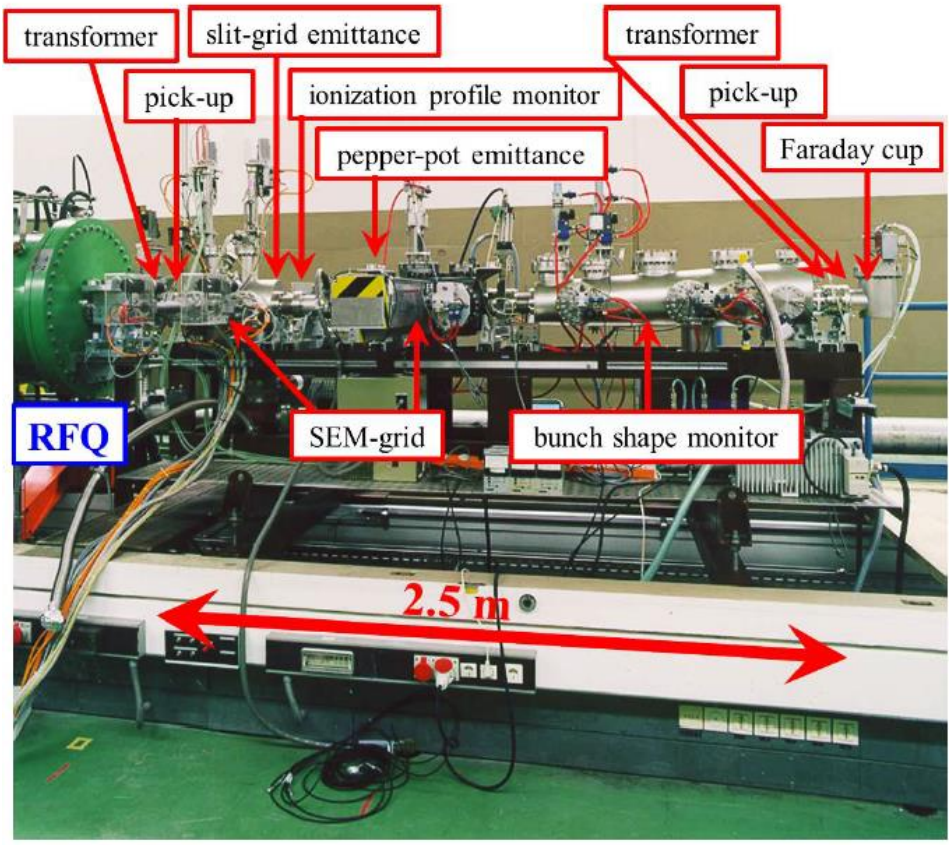


Рисунок 1.1.6 – Диагностический стенд GSI для настройки RFQ

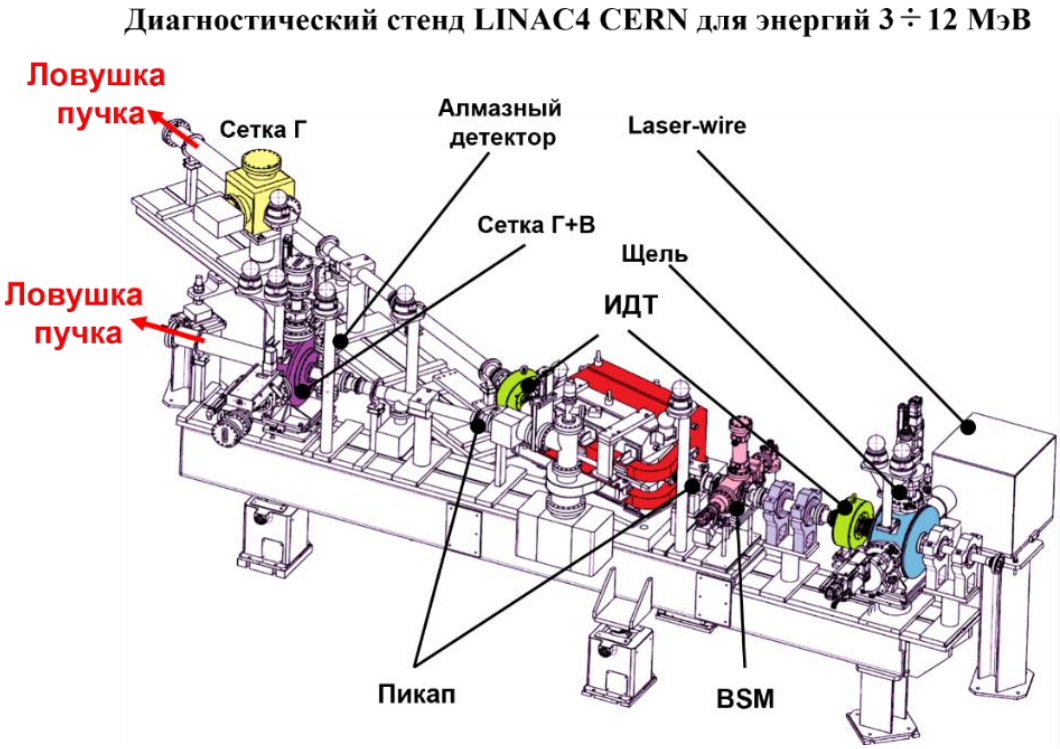


Рисунок 1.1.7 – Диагностический стенд LINAC4 CERN для RFQ и DTL-1

1.2 Ток пучка

Электрический ток пучка ускоренных частиц является одним из важнейших параметров, измерение и контроль которого производятся практически непрерывно при работе любого крупного ускорителя, при этом отдельно взятые измерительные системы, как правило, покрывают ограниченный диапазон интенсивностей пучка в связи с существенными различиями между типами ускорителей и такими параметрами пучка, влияющими на измерения тока, как: тип и зарядовое состояние ускоряемых частиц, энергия и временная структура ускоряемого пучка (Рисунок 1.2.1).

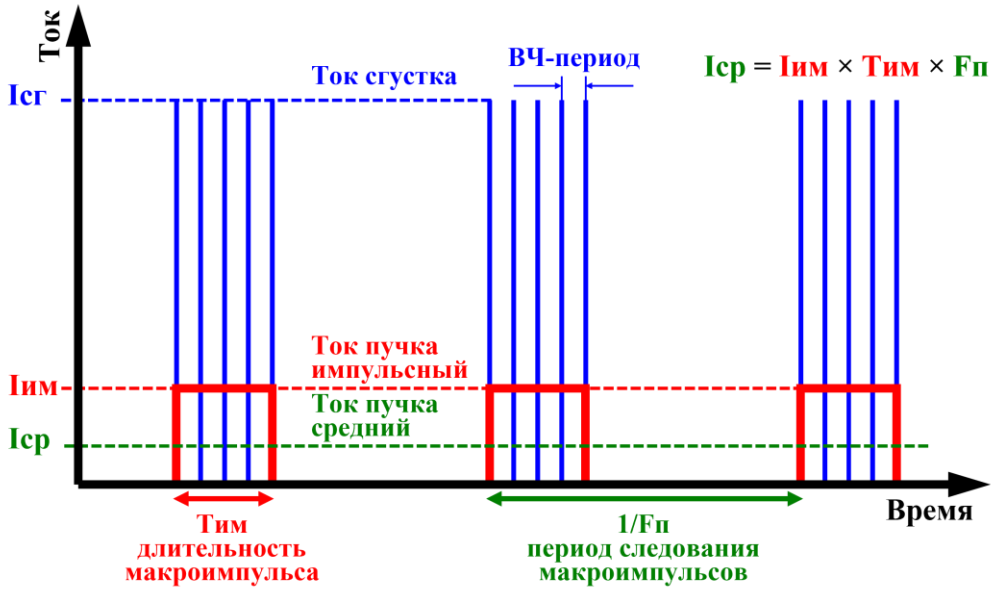


Рисунок 1.2.1 – Временная структура тока пучка в импульсном резонансном линейном ускорителе заряженных частиц

На практике существует множество детекторов для измерения тока пучка, которые условно можно разделить на несколько больших групп: электромагнитные датчики, работа которых основана на взаимодействии с электромагнитным полем пучка; контактные датчики, измеряющие заряд или энергию переданные пучком рабочему объему детектора; счетчики частиц, основанные на различных сцинтилляторах, ионизационных камерах и вторично-эмиссионных поверхностях.

Однако, исходя из соображений наибольшей универсальности, вакуумной совместимости, помехоустойчивости и, главное, возможности проведения абсолютной калибровки, наиболее типичными измерителями в случае резонансных линейных ускорителей ионов являются индукционные датчики (трансформаторы) тока и цилиндры Фарадея, которые исторически первыми использовались для измерений на ускорителях. Именно такие типы детекторов предлагается использовать для проведения измерений как импульсного, так и среднего тока ионных пучков в линаках (англоязычный термин: linac – linear accelerator).

Индукционный датчик тока

Индукционный датчик тока (ИДТ), называемый также «трансформатором тока пучка» (англоязычный термин: BCT – beam current transformer), является наиболее распространенным устройством для построения систем измерений тока и используется на самых разных ускорителях и каналах транспортировки как электронных, так и ионных пучков с любыми временными структурами благодаря следующим преимуществам:

- невозмущающие измерения на основе детектирования магнитного поля пучка и, как следствие, возможность построения систем непрерывного контроля и обратной связи для управления интенсивностью пучка;
- независимость результатов измерений от других параметров пучка, таких как размер, положение и энергия;
- прямая пропорциональность выходного сигнала измеряемому току пучка с возможностью точной абсолютной калибровки датчика.

Физические принципы работы и типичные характеристики

Название «трансформатор тока пучка» связано с тем, что конструкция ИДТ имеет характерный вид трансформатора, в котором пучок, проходящий сквозь сердечник тороидальной формы из материала с высокой магнитной

проницаемостью, играет роль «первичной обмотки», а N витков изолированного провода, намотанные вокруг сердечника, являются «вторичной обмоткой» трансформатора с индуктивностью L:

$$L = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \cdot hN^2 \cdot \ln \frac{r_{\text{внеш}}}{r_{\text{внутр}}}, \tag{1.2.1}$$

где μ – относительная магнитная проницаемость материала, из которого сделан сердечник толщиной h вдоль пучка, с внешним радиусом $r_{\text{внеш}}$ и внутренним радиусом $r_{\text{внутр}}$.

Для идеального трансформатора тока соотношение между измеряемым током во вторичной обмотке I и током пучка $I_{\text{п}}$ выражается простой формулой:

$$I = \frac{I_{\text{п}}}{N}, \tag{1.2.2}$$

при этом на практике вместо тока удобнее измерять наведенное напряжение $U(t) = L\,{}^{\mathrm{d}I}/_{\mathrm{d}t}$ на нагрузочном сопротивлении R, тогда измеряемый сигнал ИДТ определяется, как

$$U = R \cdot I = \frac{R}{N} \cdot I_{\text{п}} \equiv S \cdot I_{\text{п}}, \tag{1.2.3}$$

где соотношение между сигнальным напряжением и током пучка S [В/А] называется чувствительностью или передаточным импедансом ИДТ.

Таким образом, измеряемый сигнал в обмотке создается переменным магнитным полем, формируемым током пучка, и представляет собой переменное напряжение, частота которого равна частоте следования импульсов тока пучка ускоренных частиц, при этом для проведения точной абсолютной калибровки датчика используется дополнительный одиночный виток для подачи известного значения тока. Наличие тороидального сердечника, в котором замыкаются линии магнитного поля, позволяет также измерять только азимутальную составляющую поля тока пучка, в результате чего величина сигнала оказывается слабо зависящей от размера и положения пучка, проходящего сквозь ИДТ.

Для понимания особенностей ИДТ, используемых для пучков с разной временно́й структурой, необходимо рассмотреть типы используемых электрических схем для регистрации сигнального напряжения (Рисунок 1.2.2).

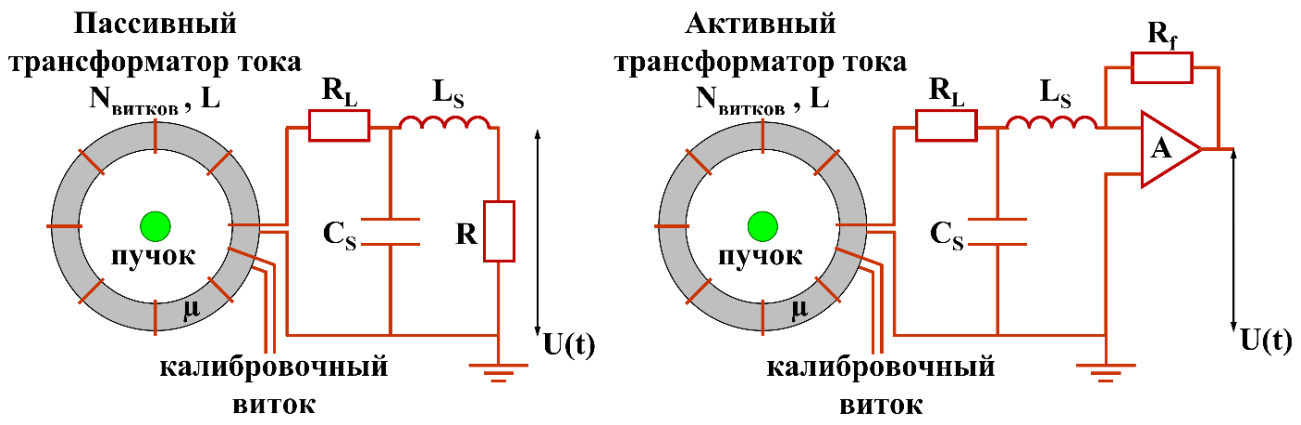


Рисунок 1.2.2 – Структурные схемы пассивного и активного трансформаторов тока пучка

Схема для, так называемого, пассивного или быстрого трансформатора тока (англоязычный термин: FCT – fast current transformer) очень проста – напряжение измеряется на нагрузке $R = 50$ Ом, однако необходимо учитывать паразитную емкость C_S, обусловленную емкостью между витками обмотки, между обмоткой и сердечником, а также емкостью экранированных сигнальных кабелей от обмотки до сопротивления нагрузки, при этом более реалистичная модель, конечно, включает в себя паразитную индуктивность между витками обмотки L_S и дополнительное омическое сопротивление обмотки и соединительных кабелей R_L.

Импеданс Z такого колебательного контура известным образом зависит от частоты возбуждающих колебаний $\omega = 2\pi f$. Рабочим диапазоном принято считать частотную область $\omega_{min} = {}^{R}/_{L} \ll \omega \ll {}^{1}/_{RC_S} = \omega_{max}$, в которой $Z \cong R$, и падение напряжения на нагрузочном сопротивлении является наибольшим. Уменьшение импеданса нагрузки позволяет в реальных схемах ИДТ довести нижнюю границу полосы частот f_{min} до нескольких герц, но не до постоянного тока.

Для правильной обработки результатов измерений важное значение имеет не только амплитуда сигнала, но и форма временного отклика датчика на заданный импульс тока пучка. В связи с этим, обычно использует понятия «постоянной времени нарастания» фронта импульса $\tau_н$ и «постоянной времени спада» вершины импульса $\tau_с$ (Рисунок 1.2.3).

Если возбуждающий импульс представляет собой ступенчатую функцию, то фронт измеряемого сигнала растет пропорционально $A_ф \propto \left(1 - e^{-t/\tau_н}\right)$, а вершина импульса спадает, как $A_в \propto \left(1 - e^{-t/\tau_c}\right)$, т. е. эти постоянные равны временам, за которые соответствующие сигналы меняются на $e^{-1} = 37\%$, и для пассивного трансформатора равны:

$$\tau_н = \sqrt{L_S C_S} \quad \text{и} \quad \tau_c = \frac{L}{R + R_L}. \tag{1.2.4}$$

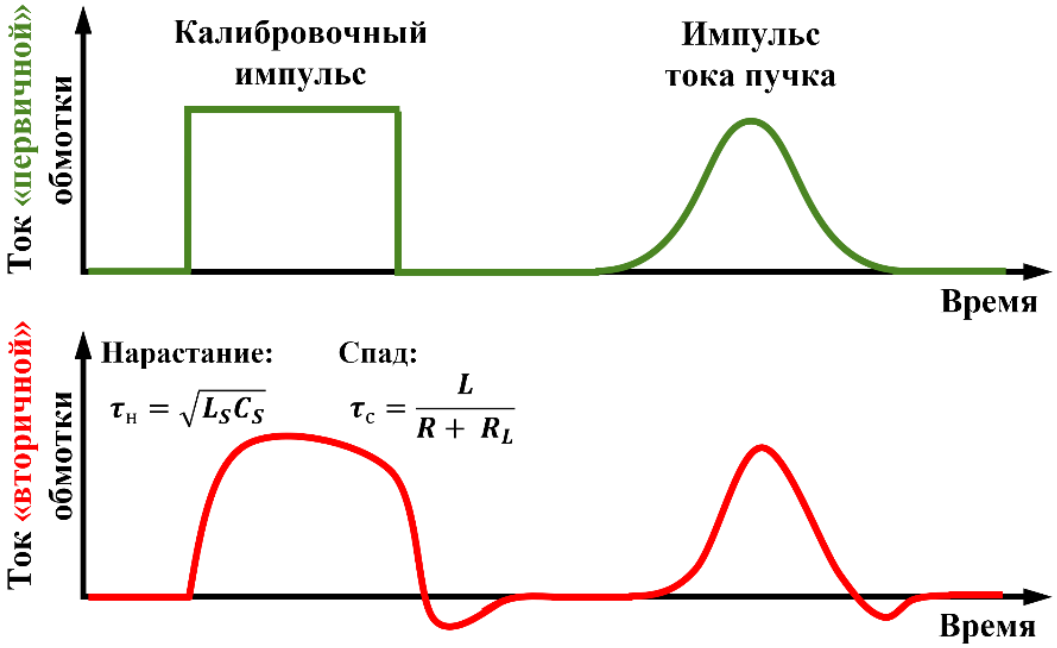


Рисунок 1.2.3 – Отклик пассивного ИДТ на калибровочный импульс и импульс тока пучка

Во временной области принято использовать понятия времени нарастания / спада, которые определяются временем изменения величины сигнала

от 10% до 90% от максимальной амплитуды, что может быть записано в следующем эквивалентном виде:

$$t_{\text{н}} = \frac{\ln 0.9 - \ln 0.1}{\omega_{max}} = \frac{\ln 9}{\omega_{max}} \cong 2.2 \cdot \tau_{\text{н}}\,, \qquad t_c = \frac{\ln 0.9 - \ln 0.1}{\omega_{min}} = \frac{\ln 9}{\omega_{min}} \cong 2.2 \cdot \tau_c\,. \tag{1.2.5}$$

Пассивные (быстрые) трансформаторы используются в основном для измерений коротких импульсов тока (<1 мкс) и дают возможность получать субнаносекундные времена нарастания фронта токового импульса, что актуально для пучков в синхротронах.

Напротив, в схеме активного трансформатора тока, или трансформатора переменного тока, (англоязычный термин: ACCT – AC-current transformer), применяемого для импульсов с длительностью больше 1 мкс, увеличение времени спада вершины импульса достигается заменой нагрузочного сопротивления операционным усилителем с коэффициентом усиления A и резистором обратной связи R_f.

Благодаря такому трансимпедансному усилителю, который также называют конвертером тока в напряжение, постоянная спада увеличивается до

$$\tau_c = \frac{L}{R_f/A + R_L} \cong \frac{L}{R_L}\,, \tag{1.2.6}$$

при этом время нарастания фронта токового импульса в активном трансформаторе оказывается значительно больше, чем в пассивном. Это объясняется выбором узкой полосы пропускания, за счет малого значения ω_{max}, операционного усилителя с целью существенного уменьшения высокочастотного шума, что в результате дает высокую чувствительность ИДТ активного типа и возможность измерений малых импульсных токов вплоть до значений ~ 1 мкА при приемлемом значении времени нарастания.

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

На основе физических принципов работы ИДТ можно сформулировать набор базовых требований к конструкции данного типа детекторов:

1. Для повышения чувствительности необходимо уменьшать количество витков в обмотке, т. к. $U(t) \propto 1/N$.
2. Для получения короткого времени нарастания, и как следствие быстрого отклика системы, необходимо снижать паразитную емкость, т. к. $t_{\text{н}} \propto \sqrt{L_S C_S}$.
3. Для корректного измерения длинных импульсов тока пучка (больше нескольких микросекунд) необходимо использовать активный тип трансформатора и увеличивать индуктивность системы, т. к. $t_c \propto L \propto N^2$.
4. Так как чувствительность и индуктивность ИДТ во многом определяются свойствами магнитного материала сердечника ($\text{S} \propto L \propto \mu$), то следует отдавать предпочтение материалам с большой относительной магнитной проницаемостью, при этом необходимо учитывать, что на частотах > 100 кГц $\mu \propto 1/f$, и определяющий вклад начинает вносить паразитная индуктивность L_{S}. Для измерений малых токов также важны небольшие потери на гистерезис и вихревые токи, малая коэрцитивная сила и высокое электрическое сопротивление, низкий уровень магнитострикции и достаточно высокая температурная стабильность. Обычно используются аморфные или кристаллические железоникелевые сплавы: пермаллои и ферриты.
5. Предотвращение протекания стеночного тока изображения пучка сквозь сердечник, т. к. этот ток равен по величине и противоположен по направлению току пучка, что приводит к нулевому наведенному сигналу в обмотке.

Важной составляющей конструкции ИДТ является защита от статических и переменных магнитных полей. Для лучшего численного понимания проблемы, можно отметить, что, например, пучок с током 1 мА создает на радиусе 40 мм магнитное поле 5 нТ, что на 4 порядка меньше магнитного поля Земли.

В общем случае, при отсутствии защиты, статическое магнитное поле приводит к частичному или полному насыщению сердечника, что можно рассматривать как сокращение его эффективного сечения, вследствие чего уменьшается индуктивность обмотки и время спада вершины импульса.

Насыщение сердечника является следствием эффекта поляризации магнитных доменов, величина которого определяется индукцией внешнего магнитного поля, магнитной проницаемостью материала и длиной пути силовой линии поля в материале сердечника по отношению к общей длине магнитного пути. В результате величина индукции наведенного поля зависит от ориентации сердечника во внешнем поле. Для типичной формы тороидального сердечника ИДТ (толщина много меньше диаметра) индукция наведенного поля в аксиальных и радиальных внешних полях на порядок меньше, чем в поперечном поле.

В отличие от статических магнитных полей, влияние которых начинает сказываться с момента частичного насыщения сердечника, переменные поля, улавливаемые ИДТ, можно наблюдать в явном виде в спектре измеряемого электроникой сигнала. Типичный активный ИДТ без защиты в диапазоне максимальной чувствительности предусилительной электроники улавливает переменные поля, начиная с уровня ~10^{-6} Тл. Источниками переменного поля могут быть не только импульсные системы фокусировки (например, квадруполи), но и системы ВЧ-питания ускоряющих резонаторов, оборудование системы вакуумной откачки, а также помехи на промышленной частоте 50 Гц [54] (Рисунок 1.2.4).

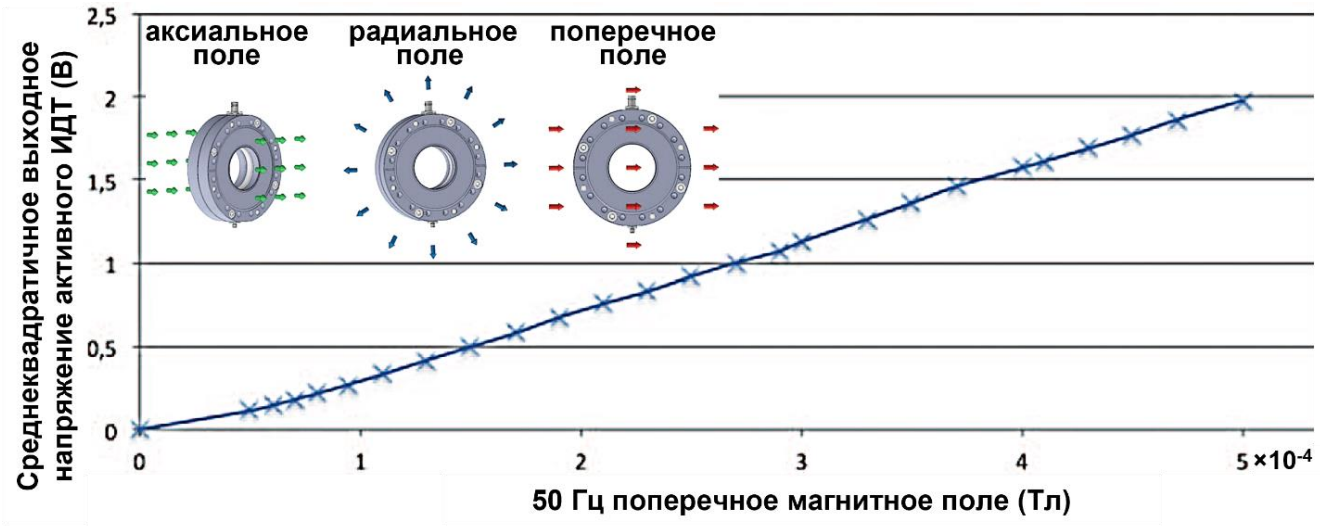


Рисунок 1.2.4 – Пример влияния поперечного магнитного поля на сигнал активного ИДТ фирмы Bergoz

В общем случае ослабление поля за защитой происходит благодаря потерям на поглощение и отражение, а также из-за отклонения силовых линий от их начального пути.

Основное снижение величины индукции статических магнитных полей до приемлемого уровня может быть достигнуто с помощью замкнутых экранов, сделанных из магнитных материалов с большой магнитной проницаемостью, вне зависимости от их электропроводности. Поток внешнего магнитного поля концентрируется в основном в стенках такого экрана, которые обладают малым магнитным сопротивлением по сравнению с сопротивлением внутреннего пространства (магнитное шунтирование).

В случае импульсных магнитных полей первичное ослабление помех происходит благодаря симметрии витков кольцевой обмотки относительно линий магнитного поля. Остаточный ток зависит от однородности поля, количества витков и разницы их геометрии. При наличии кольцевого магнитного сердечника помеха ослабляется также из-за того, что результирующее магнитное поле помехи в сердечнике уменьшается благодаря появлению размагничивающего поля вследствие поляризации магнетика, в отличие от замкнутого магнитного поля пучка, для которого размагничивающий фактор равен нулю. При этом наиболее эффективной защитой для высокочастотного случая является проводящий экран, где ослабление происходит за счет поля наведенных токов, текущих в скин-слое.

Таким образом, оптимальным выбором для экранирования постоянных и низкочастотных полей является магнитный проводящий материал с минимальной толщиной скин-слоя $\delta_S \cong \sqrt{2/(\sigma\mu\mu_0\omega)}$. Наиболее подходящими в этом случае являются различные пермаллои ($\sigma\mu$ = ~ 10^{10} См/м) и магнитомягкие углеродистые стали (~ 10^9 См/м). Наибольшей эффективностью будет обладать многослойный экран из комбинации материалов с разными электромагнитными характеристиками, при этом внешние слои должны обладать большой индукцией насыщения, чтобы избежать насыщения внутренних слоев с большой магнитной проницаемостью, но малой индукцией насыщения.

Кроме того, важным уровнем защиты является прием и передача сигналов дифференциальным образом по витой паре с заземленным экраном, что обеспечивает вычитание синфазных помех на уровне электроники. В этом случае ИДТ оказывается нечувствительным к частицам пучка, вторичным электронам и электронам обдирки, попадающим в сердечник и заряжающим собственную емкость датчика относительно земли, в результате чего на концах обмотки формируется синфазный сигнал. Однако сигналы от потоков вторичных частиц, движущихся сквозь сердечник, не могут быть отфильтрованы подобным образом, и вносят ошибку в измерения тока первичного пучка, поэтому измерения могут быть существенно искажены в условиях плохого вакуума в ионопроводе или значительных потерях пучка в области размещения ИДТ.

Существует большое количество конструкций ИДТ, реализованных на практике, поэтому в качестве примеров стоит привести лишь самые типичные и показательные варианты. В частности, наибольшее распространение в ускорительном сообществе получили датчики французской фирмы Bergoz Instrumentation, которая более 40 лет производит и поставляет коммерчески доступные трансформаторы тока для пучков с самыми разными параметрами. Стандартные комплекты в вакуумном исполнении на основе Conflat-фланцев, состоящие из активного трансформатора тока с магнитной защитой сердечника и предусилительной электроники со встроенной системой калибровки и переключаемыми коэффициентами усиления сигнала показаны на рисунке 1.2.5.

Характерной особенностью датчиков Bergoz является использование ленточного сердечника, сделанного из аморфного сплава с высокой магнитной проницаемостью (Vitrovac, Nanoperm), и вакуумноплотной керамической вставки, прерывающей токи изображения пучка. Конфигурации активных трансформаторов тока Bergoz обладают полосой пропускания от 3 Гц до 1 МГц, спадом вершины < 2 %/мс, временем нарастания 350 нс и измерительными диапазонами от ±1 мА до ±2 А с разрешением ~1.5 мкА в миллиамперном диапазоне.

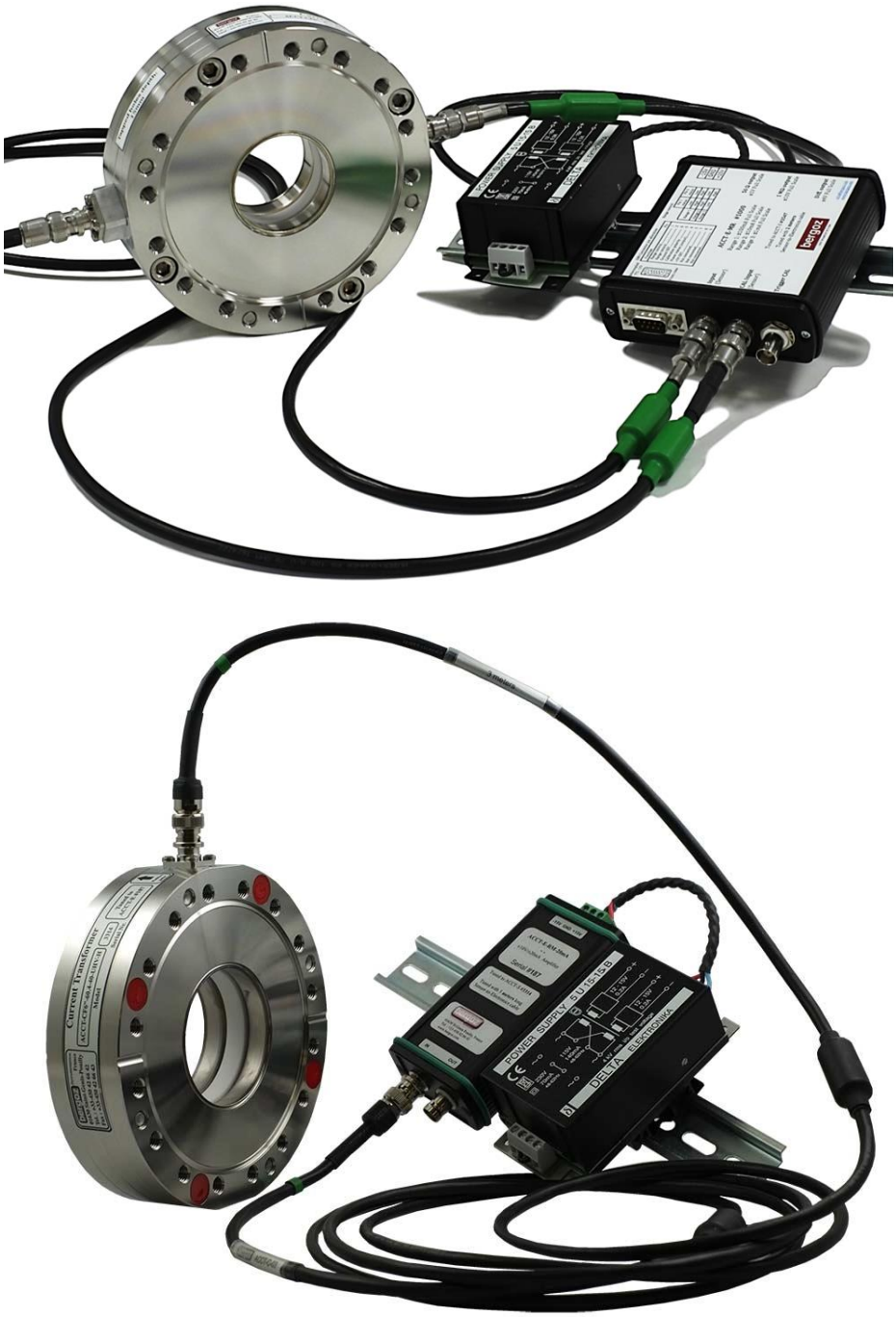


Рисунок 1.2.5 – Вакуумные ACCT Bergoz с предусилительной электроникой

Многие ускорительные центры сами разрабатывают индукционные датчики тока с геометрическими и электрическими характеристиками, подходящими под параметры конкретного ускорителя, при этом чаще всего встречаются конструкции, в которых ленточные сердечники отделены от вакуума керамической вставкой или витоновой прокладкой (Рисунки 1.2.6 [55], 1.2.7 [45], 1.2.8 [56]).

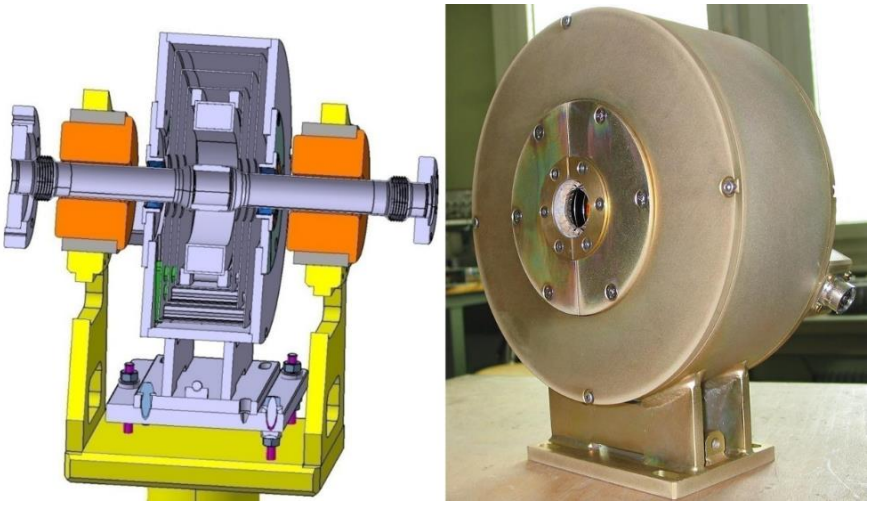


Рисунок 1.2.6 – Трехмерная модель и собранный ИДТ для LINAC4 CERN

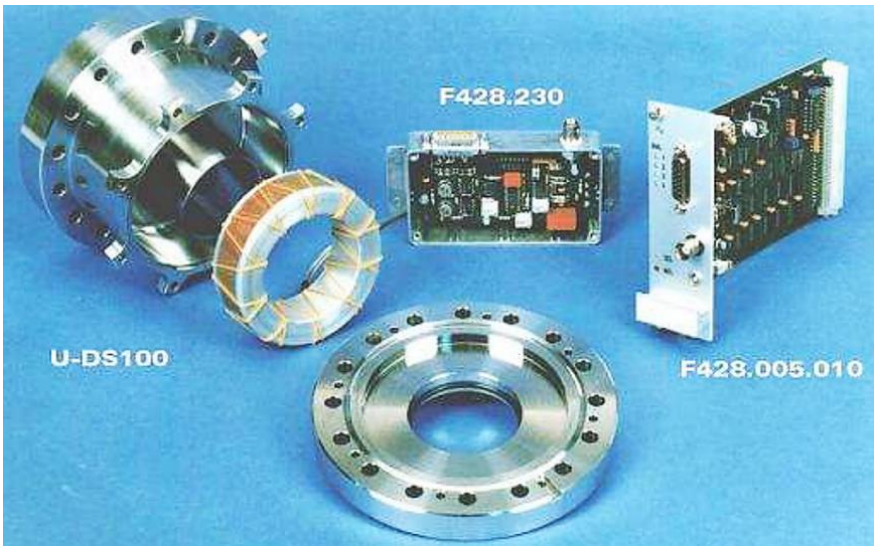


Рисунок 1.2.7 – Активный ИДТ для линака тяжелых ионов UNILAC GSI

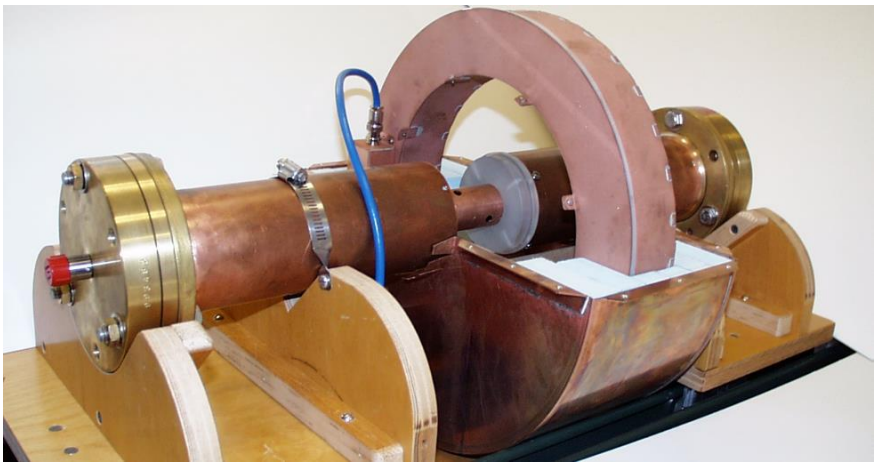


Рисунок 1.2.8 – ИДТ SNS ORNL на испытаниях электромагнитной защиты

Цилиндр Фарадея

Цилиндр Фарадея (ЦФ) (англоязычный термин: FC – Faraday cup) является наиболее точным устройством, позволяющим проводить прямые абсолютные измерения тока пучка, и часто используется в качестве эталона для калибровки других измерителей. Несмотря на существенный недостаток, заключающийся в полностью разрушающем принципе измерений, это диагностическое устройство обладает важными преимуществами:

- широкий диапазон измерения токов: от пикоампер до килоампер,
- возможность использования в качестве ловушки для настройки пучка,
- универсальная конструкция для переменных и постоянных токов.

Обычно, цилиндры Фарадея имеют полосу пропускания до 10 МГц и используются для измерений квазинепрерывных пучков и пучков с длительностью импульса от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд.

Физические принципы работы и типичные характеристики

Работа ЦФ основана на полной остановке заряженных частиц пучка в изолированном токопроводящем электроде, ток с которого снимается через резистивную нагрузку или трансимпедансный предусилитель (Рисунок 1.2.9). Результат измерений может быть существенно искажен из-за вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ), возникающей при попадании первичного пучка в поверхность ЦФ. Поток вторичных электронов пропорционален косинусу угла между их траекторией и поверхностью, а энергия не превышает 50 эВ, причем максимум спектра лежит в диапазоне 1÷10 эВ. Для уменьшения утечки тока вторичных электронов можно использовать удлиненную форму ЦФ, электрод под отрицательным «запирающим» потенциалом смещения и/или постоянное магнитное поле, которое направляет электроны по циклотронному радиусу к стенкам цилиндра.

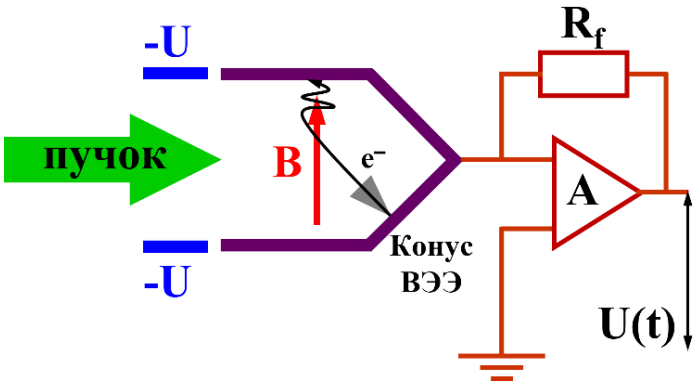


Рисунок 1.2.9 – Структурная схема цилиндра Фарадея

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Конструкция цилиндра Фарадея сильно зависит от параметров измеряемого пучка и может быть достаточно сложной, в особенности для больших значений энергии или среднего тока пучка, а также для измерения ультракоротких импульсов тока.

В случае низкоинтенсивных низкоэнергетических пучков ионов конфигурация ЦФ становится достаточно простой и компактной, т. к. отсутствуют проблемы тепловых нагрузок и/или больших пробегов частиц пучка в материале электрода, и основной задачей становится минимизация паразитной утечки тока.

Ток вторичных электронов описывается формулой Штернгласса:

$$I_{\text{ВЭЭ}} = Y\frac{\mathrm{d}E}{\rho \mathrm{d}x} I_{\text{п}} = \delta \cdot I_{\text{п}}\,, \tag{1.2.7}$$

где Y – выход вторичных электронов на единицу удельных ионизационных потерь, а итоговый коэффициент пропорциональности δ – коэффициент вторичной эмиссии (Рисунок 1.2.10) [57], который зависит от удельных ионизационных потерь пучка в поверхностном слое электрода, а также от работы выхода материала и качества поверхности (механическая обработка и химическая чистота).

Использование потенциала смещения для подавления ВЭЭ наиболее удобно на практике при правильно выбранной удлиненной кольцевой геометрии электрода (Рисунок 1.2.11) [58], когда падение потенциала на оси ЦФ составляет менее 50% и для эффективного подавления достаточно разности потенциалов ~ –100 В.

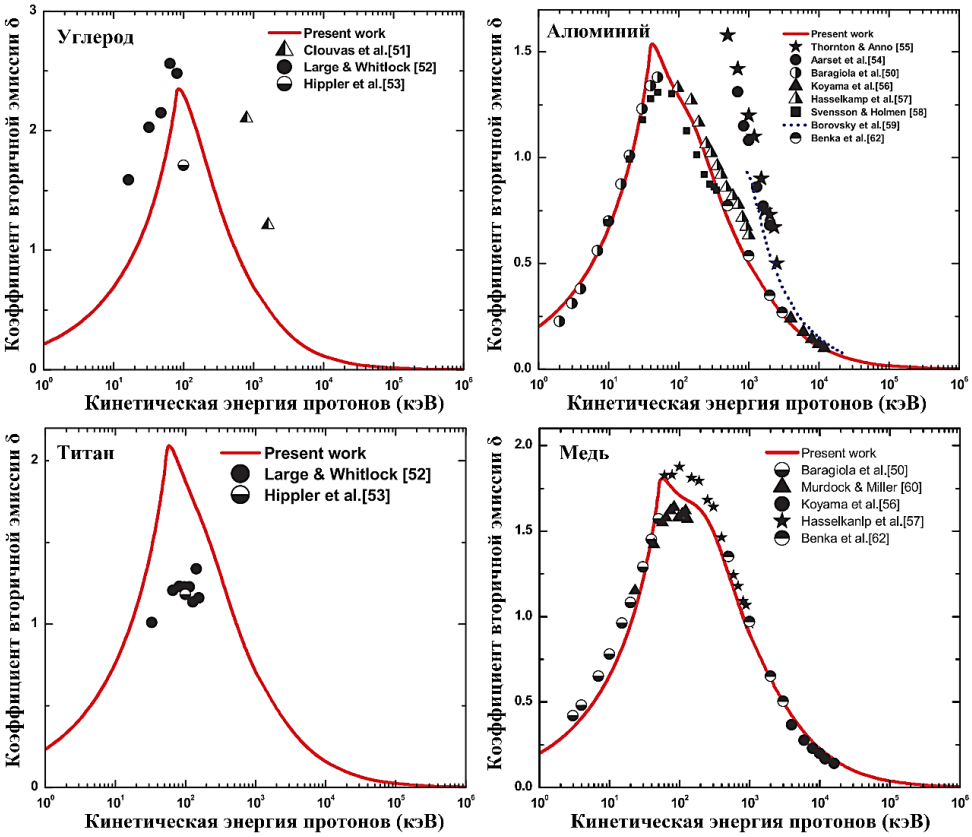


Рисунок 1.2.10 – Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии пучка протонов

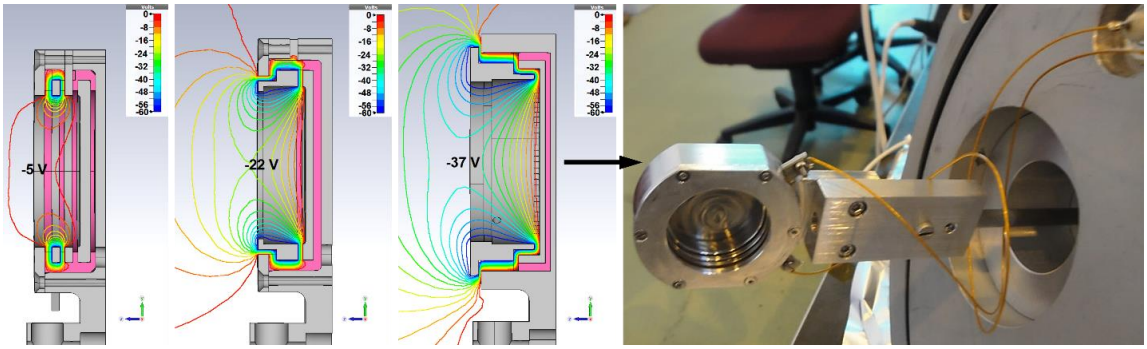


Рисунок 1.2.11 – Компактный ЦФ с потенциалом -60 В для HIE-ISOLDE CERN

Распыление поверхностного слоя сигнального электрода может приводить к возникновению электропроводящего напыления на поверхностях изоляторов в составе ЦФ. Для минимизации данного эффекта, особенно в случае работы с пучками тяжелых ионов, рекомендуется проектировать конструкцию ЦФ таким образом, чтобы изоляторы были защищены от возможных потоков распыленных атомов, а дно цилиндра, который обычно изготавливается из меди или графита, покрывать более устойчивым к распылению материалом, например, вольфрамовой или танталовой фольгой.

В случае измерения высокоинтенсивных пучков, со средней мощностью больше нескольких ватт, основной проблемой является распределение и теплосъем энергии пучка, передаваемой цилиндру в результате ионизационных потерь. Ключевые различия в конфигурациях ЦФ, рассчитанных на высокие мощности измеряемого пучка, заключаются в выборе тугоплавких проводящих материалов (Рисунок 1.2.12) для сигнального электрода (вольфрам, тантал, графит), его геометрической конфигурации для увеличения площади поверхности взаимодействия с пучком, а также, в конструкции системы охлаждения.

Как правило, такие ЦФ имеют конусообразную форму или дополнительные канавки на плоской поверхности сигнального электрода для увеличения площади взаимодействия с пучком, что дает более равномерное распределение ионизационных потерь и снижение вероятности импульсной термоэмиссии электронов.

Типичная конфигурация для интенсивных пучков, учитывающая все наиболее важные составляющие ЦФ такого типа (материалы, форму, активное охлаждение), а также содержащая компоненты для предотвращения эффектов распыления поверхности сигнального электрода и утечки тока из-за ВЭЭ приведена на рисунке 1.2.13 [45].

Рисунок 1.2.12 – ЦФ для линака протонов ESS с графитовым электродом

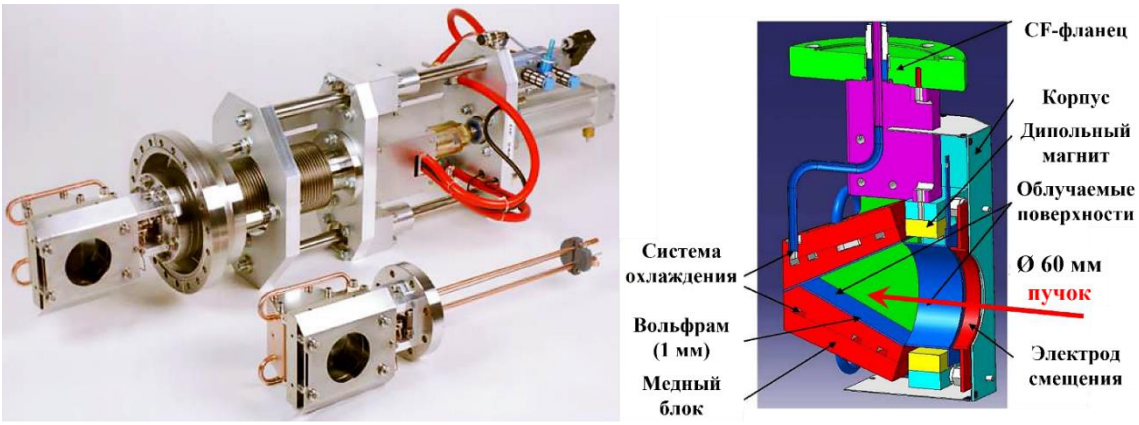


Рисунок 1.2.13 – Охлаждаемый ЦФ для высокоинтенсивных ионных пучков GSI

Общий теплосъем средней мощности пучка, как правило, осуществляется системой активного водяного охлаждения. Если обычная не обессоленная охлаждающая вода находится в прямом контакте с сигнальным электродом ЦФ, то её протекание по каналам охлаждения будет производить существенный фоновый ток, который может достигать нескольких миллиампер, поэтому при проектировании подобных систем необходимо уделять особое внимание выбору материалов, как вступающих в контакт с водой, так и контактирующих друг с другом, так как различия в электродных потенциалах могут привести к образованию гальванического элемента и, как следствие, к существенному искажению измерений тока.

Для устранения этих эффектов есть два возможных технологических решения:

- Непрямое охлаждение, при котором водоохлаждаемая пластина электрически изолирована от сигнального электрода (Рисунок 1.2.14). При этом изолятор должен обладать хорошей теплопроводностью. Наиболее подходящим материалом для этой задачи является нитрид алюминия – теплопроводящая керамика с коэффициентом теплопроводности ~ 180 Вт/(м·К) (алюминий – ~ 240 Вт/(м·К), медь – ~ 400 Вт/(м·К)).
- Использование неионогенного теплоносителя. В случае, когда тепловые нагрузки слишком велики для непрямого охлаждения, необходимо использовать замкнутый охлаждающий контур на основе, например, деионизованной воды. Однако следует учесть, что деионизованная вода

способна вызывать коррозию целого ряда материалов, включая некоторые типы нержавеющих сталей, разрушая их и загрязняясь сама, что также приводит к возникновению тока утечки, поэтому наиболее распространенными компонентами таких охлаждающих систем являются медь и пластики.

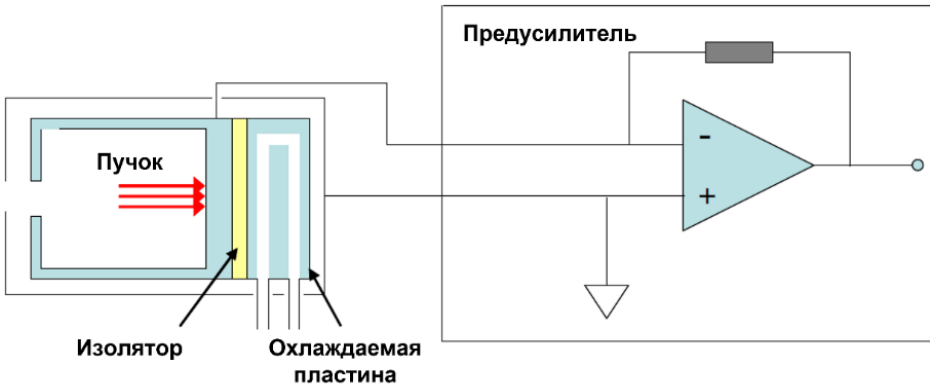


Рисунок 1.2.14 – Схема непрямого контактного охлаждения ЦФ

Решающим ограничением для выбора материалов и конструкции охлаждаемого ЦФ является иногда предъявляемое вакуумное требование отсутствия сварных или паяных швов на границе «вода-вакуум» (Рисунок 1.2.15) [59], которые создают значительные риски прорыва охлаждающей жидкости, циркулирующей под высоким давлением, в вакуумный контур ускорителя.

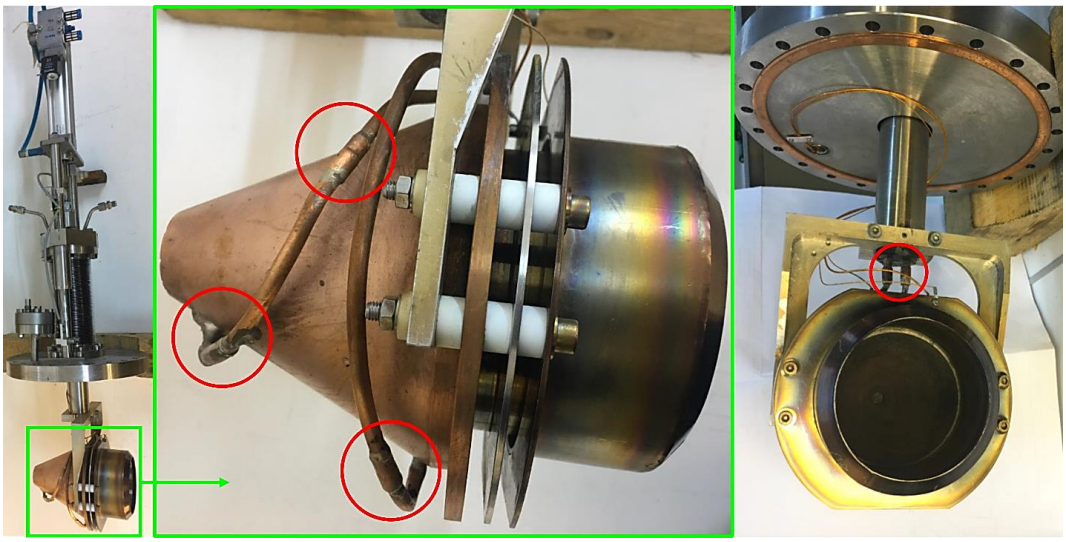


Рисунок 1.2.15 – Охлаждаемый ЦФ для протонного пучка iThemba Labs

Наличие подобных швов существенно упрощает структуру системы охлаждения, позволяя использовать стандартные компактные металлокерамические изоляторы для вывода трубок охлаждения из вакуумной камеры ЦФ (Рисунок 1.2.16).

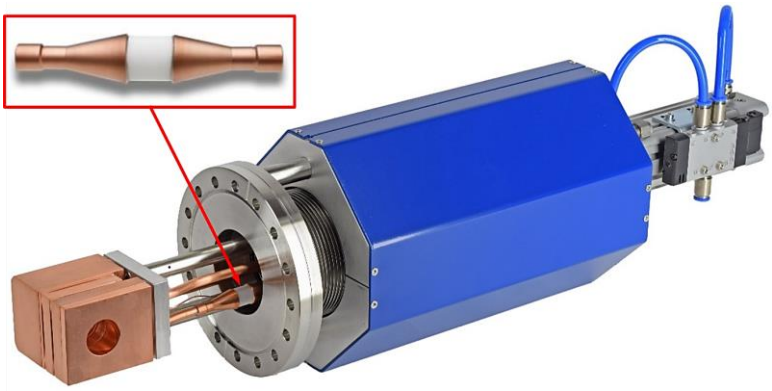


Рисунок 1.2.16 – Охлаждаемый ЦФ фирмы D-Pace для пучка мощностью 3 кВт

Электрическую изоляцию ЦФ можно также осуществлять с помощью коммерчески доступных изолирующих ниппелей на основе CF-фланцев (Рисунок 1.2.17), для которых могут быть использованы стандартные разъемы и вводы в стандарте ConFlat.

Рисунок 1.2.17 – ЦФ фирмы NTG, размещенный на изолирующем ниппеле

ЦФ, рассчитанные на мощность пучка более ~5 кВт, обычно монтируются в специализированных вакуумных боксах с прямоугольными фланцами (Рисунок 1.2.18), т. к. размеры таких ЦФ, необходимые для рассеяния нужной мощности и размещения требуемых компонентов, не позволяют использовать фланцы стандартов CF/KF.

Подобные ЦФ неизбежно отличаются значительными размерами, высокой стоимостью, сложностями в ремонте и повышенной опасностью нарушения вакуумного контура ускорителя из-за большого числа внутренних соединений «вода-вакуум».

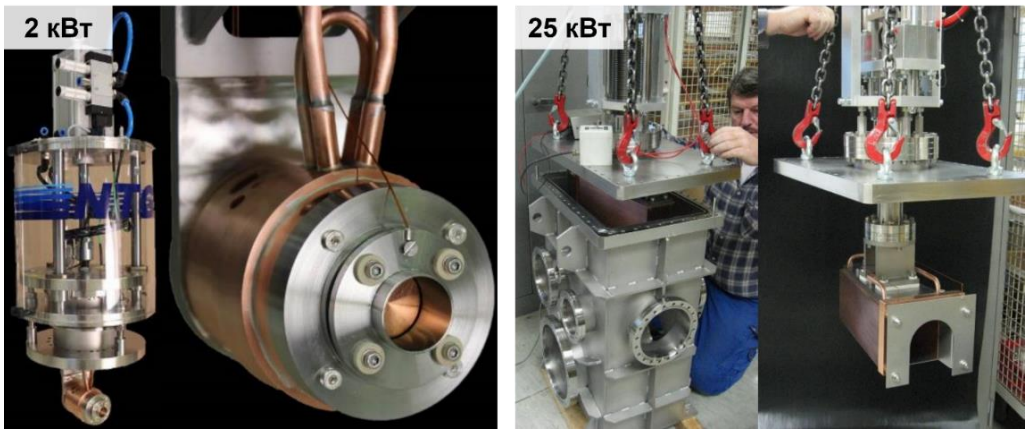


Рисунок 1.2.18 – Охлаждаемые ЦФ фирмы NTG для высокоинтенсивных пучков

В случае работы с пучками отрицательных ионов водорода существует еще один существенный канал утечки тока: обратно рассеянные слабосвязанные электроны, которые обдираются практически мгновенно при взаимодействии с веществом, и их можно считать свободными с максимальной энергией равной $E_e=E_{пучка}/1836$. Для пучков с энергиями выше нескольких МэВ энергия таких электронов превышает 1 кэВ, и подавление потоков таких высокоэнергетичных электронов электрическим потенциалом представляет существенную проблему, поэтому в данном случае необходимо использование магнитной системы и/или сильно вытянутой конусообразной конструкции, при этом известно, что для электронов с энергиями <1 МэВ доля обратно рассеянных электронов составляет ~10% для легких материалов (графит) и до 50% для тяжелых материалов (вольфрам, тантал) [42].

Измерение эффективности сбора заряда в ЦФ можно провести при помощи ИДТ так называемым «ноль-методом» (Рисунок 1.2.19), который заключается в том, что заряд, собранный ЦФ, и часть заряда, определяемая соотношением постоянного R1 и переменного R2 сопротивлений, пропускаются по проводникам сквозь ИДТ в направлении, противоположном направлению движения пучка. Подбором сопротивления R2 амплитуда токового сигнала, измеряемая ИДТ, устанавливается равной нулю. В этом случае часть заряда, проходящего через ИДТ в обратном направлении и стекающего через R1 на землю, служит мерой утечки заряда в ЦФ.

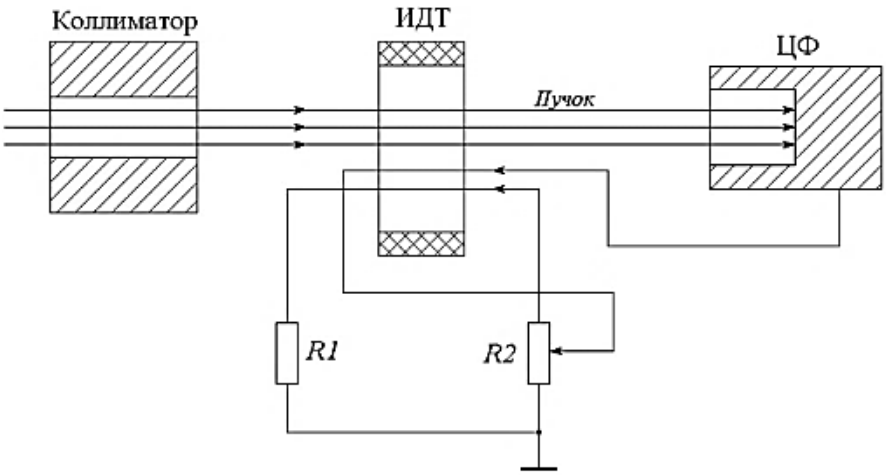


Рисунок 1.2.19 – Схема «ноль-метода» для взаимной калибровки ЦФ и ИДТ

На практике возможны несколько вариантов использования ЦФ: в виде стационарных ловушек пучка на выходах поворотных магнитов или каналов транспортировки тестовых секций и стендов, либо в виде подвижной конструкции, вводимой в пучок на время измерений или в качестве временной ловушки пучка для длительных процедур настройки ускорителя.

В случае использования ЦФ на пучках высокой средней и импульсной мощности рекомендуется использовать подвижный охлаждаемый цилиндр Фарадея, играющий одновременно роль аварийной ловушки пучка, только в канале LEBT, где средняя мощность пучка, как правило, не превышает 100÷200 Вт.

Начиная с выхода RFQ, где средняя мощность в пучке может достигать нескольких кВт, следует выбирать индукционные датчики тока для обеспечения неразрушающих токовых измерений. При необходимости создания отдельной ловушки пучка на выходе ускорителя возможно использование относительно простых конструкций, предназначенных только для процесса теплосъема и не включающих в себя весь комплекс мер по измерению импульсов тока пучка, свойственных цилиндрам Фарадея.

Кроме того, возможна комбинированная конструкция, в которой цилиндр Фарадея перестает быть отдельным диагностическим устройством и совмещается с мишенной сборкой. Наиболее показательный пример такой конструкции приведен на рисунке 1.2.20, где изображена мишенная сборка компактного источника нейтронов на основе циклотрона TR-24 с бериллиевой мишенью в Институте ядерной физики Чешской академии наук [60].

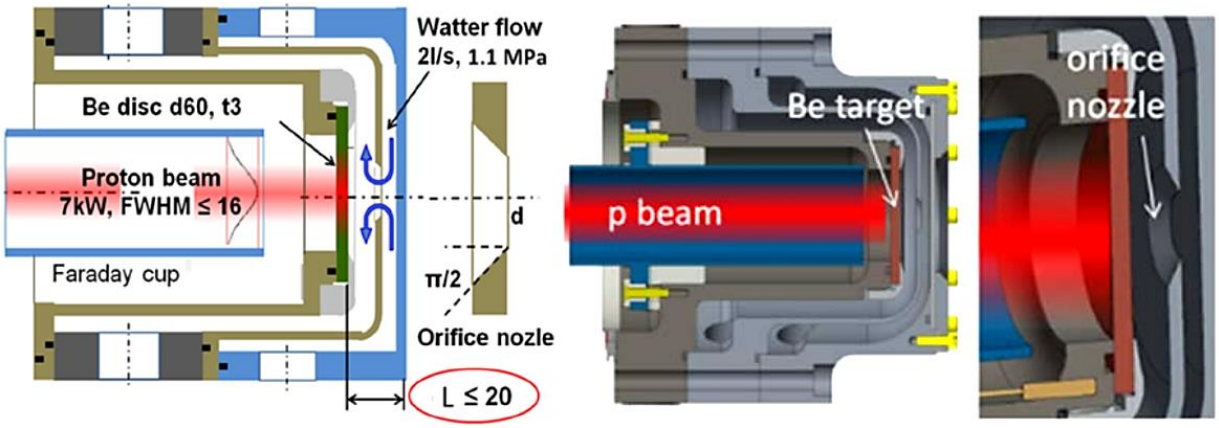


Рисунок 1.2.20 – Схема охлаждаемой мишенной сборки с функцией цилиндра Фарадея для источника нейтронов на основе бериллиевого p-n конвертера

Для проведения процедур настройки и ввода в эксплуатацию отдельных секций рекомендуется также использовать сборку простой охлаждаемой ловушки с ИДТ на входе, либо стационарный охлаждаемый ЦФ, конструкция которого существенно упрощается за счет размещения системы охлаждения на атмосфере и отсутствия вводов движения, жидкости и электрических сигналов в вакуум (Рисунок 1.2.21) [61].

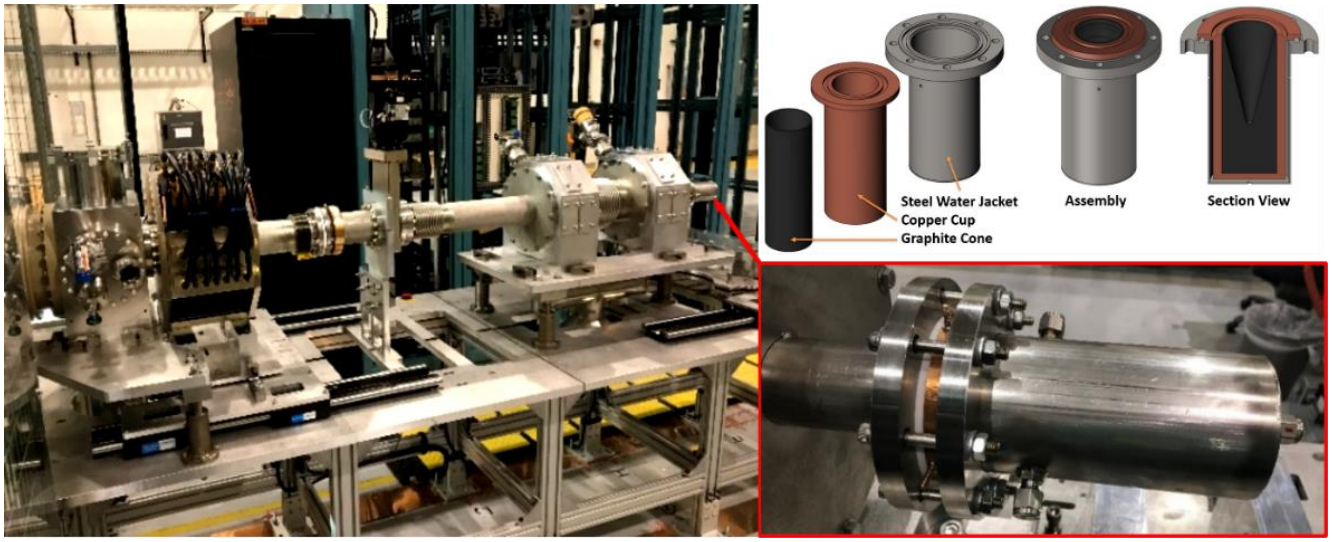


Рисунок 1.2.21 – Стационарный охлаждаемый цилиндр Фарадея на выходе канала LEBT тестового стенда настройки протонного RFQ LANSCE

В целом, представляется экономически нецелесообразным использование цилиндров Фарадея, совмещающих функции ловушки и измерителя тока высокоинтенсивного ионного пучка. Для корректных измерений в таких цилиндрах должно использоваться большое количество технологических решений, существенно увеличивающих их стоимость по сравнению с простой охлаждаемой ловушкой, рассчитанной на ту же мощность теплосъема, при этом измерения тока, например на входе поворотного магнита, можно проводить с помощью ИДТ, который будет использоваться и в номинальном режиме работы ускорителя для непрерывного неразрушающего контроля тока и качества проводки пучка.

1.3 Поперечный профиль пучка

Другим важным параметром пучка является его поперечный профиль, который постоянно меняется вдоль ускорителя под воздействием системы фокусировки, и его контроль необходим для проведения процедуры согласования поперечной динамики пучка между различными частями ускорителя и каналов транспортировки.

Конфигурация и физические принципы работы различных измерителей профиля принципиальным образом зависят от типа частиц в пучке, его энергии и тока. Для линейных резонансных ускорителей ионов существует несколько типичных групп таких измерителей: проволочные (вторично-эмиссионные) мишени, сцинтилляторы и экраны переходного излучения (для высокоэнергичных пучков), профилометры на основе эффектов ионизации и свечения остаточного газа (для высокоинтенсивных пучков), газонаполненные детекторы. Для ускорителей отрицательных ионов водорода активно развиваются методы с использованием лазерного излучения, т. н. laser-wire – относительно сложной с технологической точки зрения методики, проработанной до уровня стандартных процедур только на нескольких ускорительных комплексах в США, в частности в SNS ORNL.

К наиболее востребованным устройствам диагностики профиля пучка можно отнести проволочные сканеры и многопроволочные профилометры, люминесцентные экраны, а также ионизационные мониторы – специфическую группу диагностических устройств, обеспечивающих неразрушающие методы диагностики для непрерывного контроля поперечных параметров пучка.

Проволочный сканер

Надежным и относительно простым по конфигурации профилометром можно считать проволочный сканер (англоязычный термин: WS – wire scanner), который является наиболее распространенным устройством для построения систем измерений профиля пучка и используется на самых разных ускорителях и каналах транспортировки благодаря следующим преимуществам:

- высокая разрешающая способность;
- низкая степень разрушения пучка при проведении измерений;
- слабая зависимость результатов измерений от других параметров пучка;
- компактная конструкция;
- относительно простая предусилительная электроника.

Физические принципы работы и типичные характеристики

При попадании частиц пучка в поверхность проволочки возникает ВЭЭ, интенсивность которой описывается формулой 1.2.7, при этом проволочка приобретает заряд, равный сумме зарядов перехваченных ионов (в случае низких энергий) и вторичных электронов, покинувших ее. Измеряемым сигналом является ток вторичных электронов, который усиливается трансимпедансной предусилительной электроникой. В классической конфигурации сканера проволочка закреплена на рамке и перемещается поперек пучка с помощью вакуумного ввода движения с шаговым двигателем. Разрешающая способность проволочного сканера может достигать микронных значений и в основном зависит от толщины проволочки, при этом размер пучка определяется следующей формулой:

$$\sigma^2_{\text{пучок}} = \sigma^2_{\text{измеренное}} - 4 \cdot r^2_{\text{проволочки}} \,. \tag{1.3.1}$$

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

В большинстве случаев несколько взаимно перпендикулярных проволочек закрепляются на жесткой «вилке» и вводятся в пучок под углом 45º (Рисунок 1.3.1) [62]. Движение вилки синхронизовано с импульсами тока пучка, и измерения проводятся со скоростью одна точка профиля за один импульс пучка. Таким образом, осуществляется «сканирование» всей апертуры, в результате чего поточечно восстанавливается профиль и, на его основе, положение центра тяжести пучка. Такая конфигурация проволочного сканера используется наиболее часто в практике линейных ускорителей ионов, и основные различия касаются геометрии вилки и механизмов закрепления проволочек на ней.

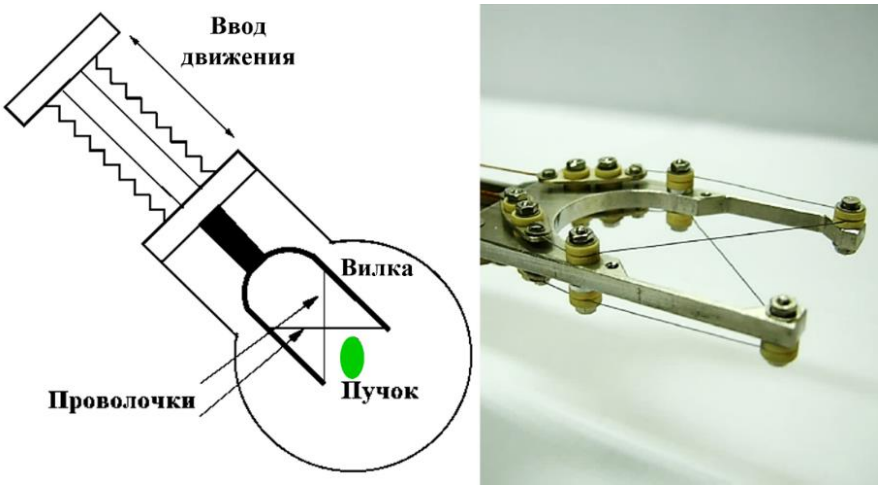


Рисунок 1.3.1 – Схема и фотография двухпроволочного сканера LINAC4 CERN

При использовании проволочных сканеров, как правило возникают три основных технологических проблемы, решение которых подбирается индивидуально на основе параметров пучка и особенностей конфигурации ускорителя.

Первой проблемой является точность изготовления, сборки и установки сканера (Рисунок 1.3.2) с целью обеспечить заданную точность и разрешающую способность устройства.

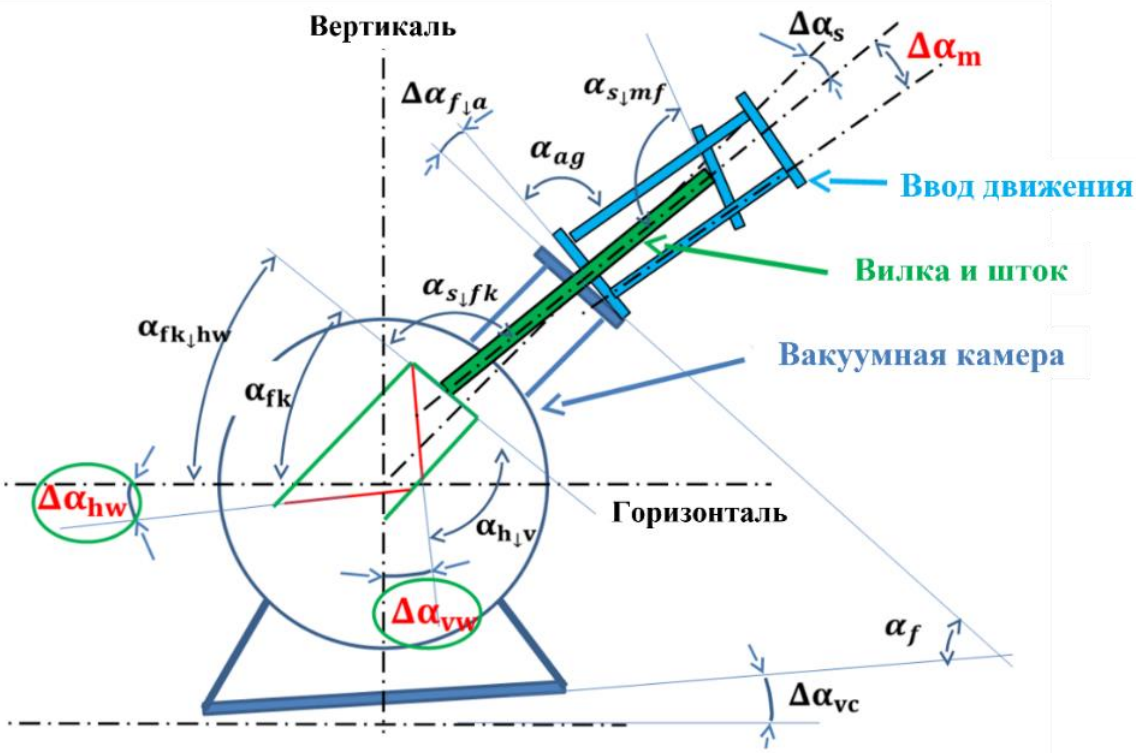


Рисунок 1.3.2 – Возможные углы отклонения при изготовлении и сборке сканера

Данная проблема решается использованием коммерчески доступных вакуумных вводов движения, производители которых обеспечивают точность изготовления на уровне десятков микрон и единиц миллирадиан, а также изготовлением вакуумной камеры и вилки сканера на современных ЧПУ-станках.

Точность установки собранного сканера определяется допусками, принятыми на данном ускорителе, и может достигать микронных значений при использовании специальных лазерных трекеров.

Второй проблемой являются, т. н. «кросс-токи» между проволочками, возникающие из-за попадания вторичных электронов с одной проволочки на другую и искажающие величину измеряемого сигнала. Данный эффект создает существенные искажения и на порядки сокращает динамический диапазон измерений, особенно в случае работы с пучками отрицательных ионов водорода. На практике существует несколько решений данной проблемы: механическое разведение проволочек в пространстве и формирование потенциалов смещения либо на отдельных электродах, либо на сигнальных проволочках.

Использование перекрестного расположения проволочек при наличии потенциалов смещения позволяет вдвое сократить рабочий ход ввода движения сканера, и упростить конструкцию как вилки, так и вакуумной камеры.

Интересным примером конструкции с перекрестным расположением проволочек (Рисунок 1.3.3) является профилометр для линака ISIS (Рисунок 1.3.4), в котором сигнальные проволочки под потенциалом виртуальной земли окружены проволочками под потенциалом смещения с регулируемой величиной до +200 В [63].

При некотором усложнении интегрирующей электроники сканера, в которой появляются дополнительные входные емкости, появляется возможность подавать отрицательный потенциал смещения непосредственно на сигнальные проволочки существенно упрощая конфигурацию вилки и сокращая ее размеры до минимально возможных в случае необходимости построения сверхкомпактных систем.

Однако при попытках расширить динамический диапазон до величин $> 10^3$ использование смещающего напряжения не дает требуемого результата.

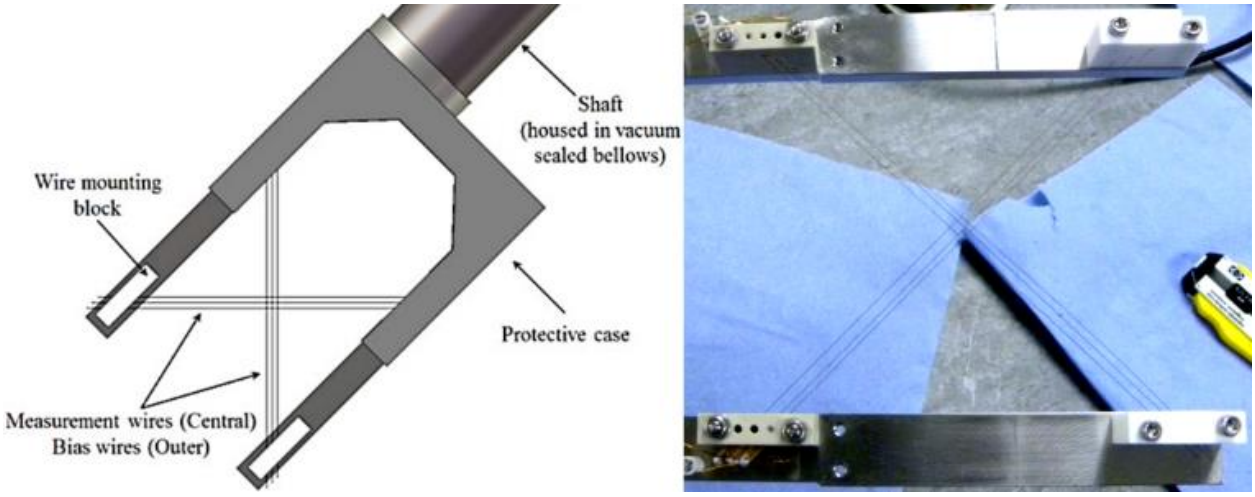


Рисунок 1.3.3 – Модель и фотография вилки профилометра линака ISIS.

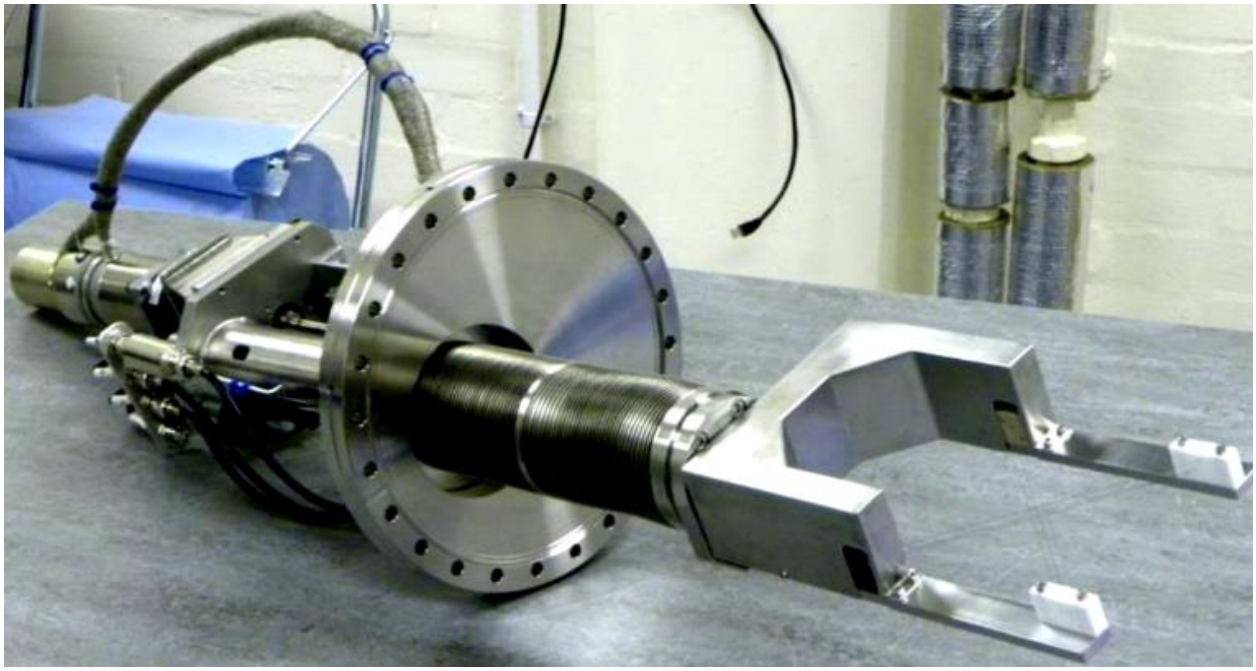


Рисунок 1.3.4 – Фотография профилометра линака ISIS в сборе с приводом.

При исследовании динамического диапазона проволочных сканеров SNS ORNL (США) [64] с перекрещивающимися проволочками было обнаружено, что для пучка ионов H^- с энергией от 2.5 до 950 МэВ наличие смещающего напряжения не избавляет систему от кросс-токов, связанных с электронами обдирки. Более того, даже при разведении проволочек в пространстве не удается полностью убрать кросс-токи (Рисунок 1.3.5), но динамический диапазон при этом вырастает примерно на порядок.

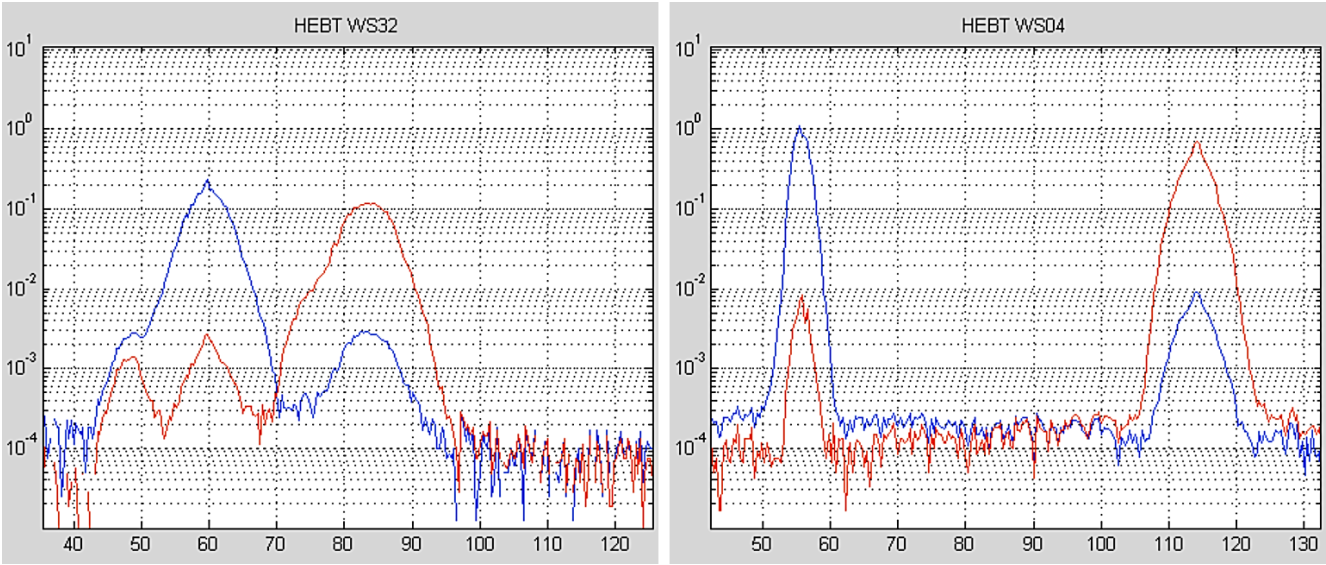


Рисунок 1.3.5. – Сигналы проволочного сканера SNS с перекрещивающимися проволочками (слева) и с разведенными проволочками (справа)

Для пучков отрицательных ионов водорода в качестве альтернативной рабочей моды таких сканеров вместо токов вторичных электронов можно использовать ток частиц, оседающих в проволочке, т. к., начиная с энергий ~3 МэВ коэффициент вторичной эмиссии для вольфрама становится меньше единицы. Для подавления вторичной эмиссии электронов, паразитной для данного режима работы, на проволочки подается положительный потенциал до +300 В. При прохождении ионов H^- через проволочку происходит несколько процессов: выбивание электронов вторичной эмиссии при пересечении частицами поверхности проволочки, обдирка электронов с иона и формирование δ-электронов, кроме того, часть электронов обдирки вылетает из проволочки из-за эффекта обратного рассеивания, при этом для тяжелых металлов, таких как вольфрам, доля рассеянных электронов может составлять до 50 %.

И, наконец, третьей основной проблемой проволочных сканеров являются тепловые нагрузки проволочек под влиянием ионизационных потерь пучка, которые существенным образом ограничивают возможности использования этих устройств на высокоинтенсивных пучках по нескольким причинам в порядке увеличения температуры нагрева:

- провисание проволочки вследствие теплового расширения;
- термоэмиссия электронов с поверхности проволочки;
- расплавление материала проволочки при критической тепловой нагрузке.

Для решения проблемы провисания проволочек используются разнообразные системы натяжения (Рисунок 1.3.6), позволяющие компенсировать увеличение длины [65, 66].

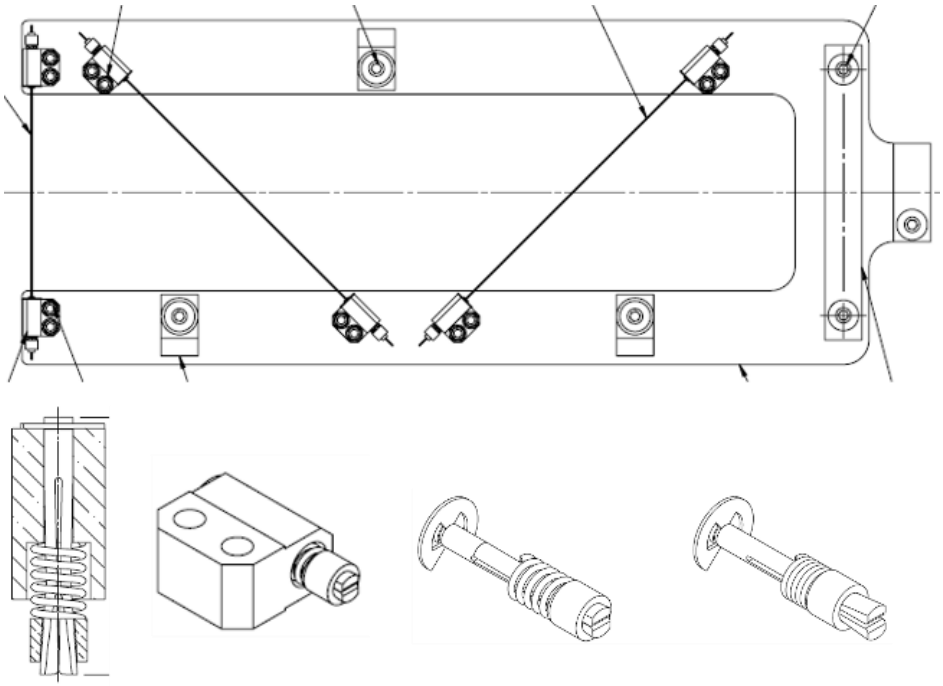


Рисунок 1.3.6 – Пример системы натяжения проволочек сканера FRIB MSU

Тепловые нагрузки рекомендуется ограничивать максимальной импульсной температурой нагрева проволочной мишени из вольфрама ~1700÷1800 К, типичной для начала эффекта термоэмиссии электронов, что, как правило, подразумевает применение сканеров исключительно в наладочных режимах работы с частотой следования импульсов ~1 Гц в случае измерений пучков МэВ-ных энергий.

Для оценок максимально допустимых интенсивностей тока измеряемого пучка, при которых температура не превышает критического значения возникновения термоэмисии, как правило, используют численное мультифизичное моделирование.

Многопроволочный профилометр

Ценой за точность пошаговых измерений с помощью проволочного сканера является время измерений, которое при малой частоте следования импульсов тока пучка может занимать минуты, поэтому в случаях, когда достаточное для измерений разрешение составляет ~1 мм и больше, удобно использовать многопроволочный профилометр (МП) в виде «арфы» (англоязычный термин: harp) или более сложной «сетки» (англоязычный термин: SEM-grid – secondary electron emission grid), позволяющих проводить полные измерения профиля в одном импульсе тока, что дает возможность оперативно оценивать и корректировать размеры и положение пучка при настройке ускорителя.

Физические принципы работы и типичные характеристики

Многопроволочный профилометр («сетка») работает на тех же физических принципах, что и проволочный сканер, принципиальное отличие заключается лишь в том, что в пучок вводится сразу несколько сигнальных проволочек, при этом имеется ряд преимуществ и недостатков, которые следует учитывать при выборе между устройствами:

- С помощью сетки поперечные профили пучка по обеим осям измеряются одновременно, в то время как сканер получает данные последовательно из разных импульсов тока, таким образом, нестабильности тока и профиля пучка во времени смешиваются и усредняются при сканирующем методе измерений.
- Система синхронизации между движением сканера, считывающей электроникой и импульсами тока пучка оказывается существенно сложнее, чем требуется в случае использования сетки.
- Разрешение сетки ограничено расстоянием между проволочками, которое обычно составляет > 1 мм, в то время как сканер может достигать микронного разрешения, при устранении эффектов механических вибрации вилки.

- Величина неравномерности коэффициента вторичной эмиссии разных участков проволоки, возникающая после больших или длительных нагрузок пучком, оказывается существенно большей для сетки, чем для сканера.
- Сетка требует одного измерительного канала на проволочку, что пропорционально увеличивает сложность и стоимость изготовления предусилительной и интегрирующей электроники по сравнению со сканером.
- Стоимость прецизионного ввода движения для сканера существенно выше более простого ввода для использования сетки.

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

На практике, так же, как и для проволочного сканера, конструктивные различия многопроволочных профилометров касаются в основном рамки, на которую крепятся проволочки и принципов формирования потенциалов смещения для уменьшения кросс-токов между соседними проволочками и между плоскостями в случае использования двухкоординатного профилометра, для чего аналогично используются дополнительные электроды. Профилометры типа «арфа» (Рисунок 1.3.7) [67] имеют одну плоскость, в которой проволочки натянуты на рамке вдоль оси, перпендикулярной оси измерений.

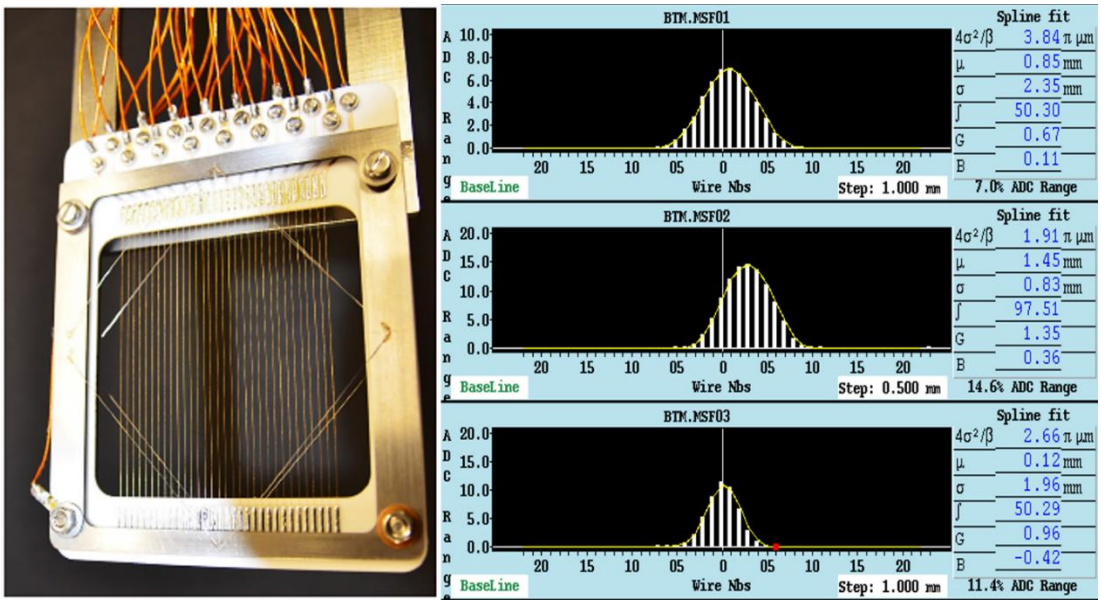


Рисунок 1.3.7 – Многопроволочный профилометр LINAC2 CERN типа «арфа»

Для одновременного измерения профилей по двум взаимно перпендикулярным осям используются «сетки» (Рисунок 1.3.8) [45], состоящие из двух плоскостей.

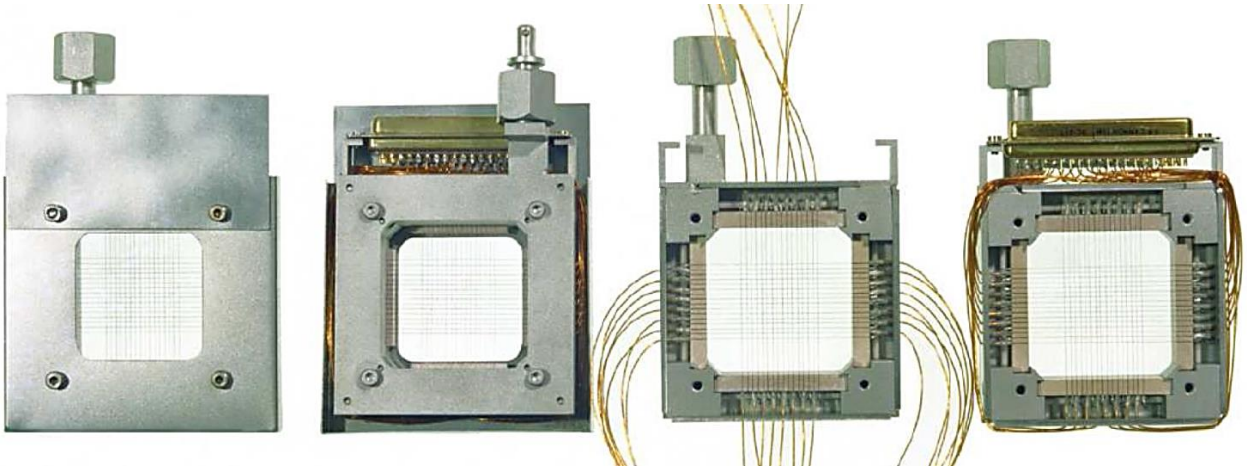


Рисунок 1.3.8 – Многопроволочный профилометр линака GSI типа «сетка»

Тепловые нагрузки могут существенно повлиять на сложность конструкции рамки из-за необходимости размещать индивидуальную систему натяжения для каждой проволочки в условиях ограниченного пространства (Рисунок 1.3.9).

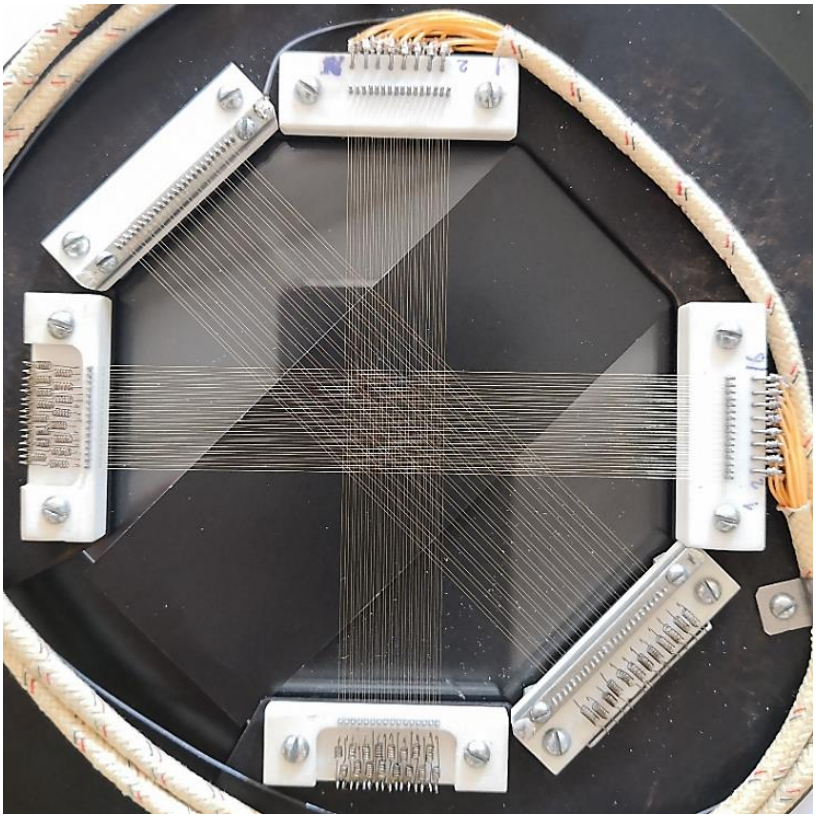


Рисунок 1.3.9 – Сетка ИФВЭ (Россия) с пружинной системой натяжения проволочек

Перегрев может приводить к эффекту «слипания», наблюдавшемуся на LINAC4 CERN, когда в процессе теплового расширения проволочки из позолоченного вольфрама соприкасались друг с другом и спаивались каплями расплавленного золота (Рисунок 1.3.10) [67].

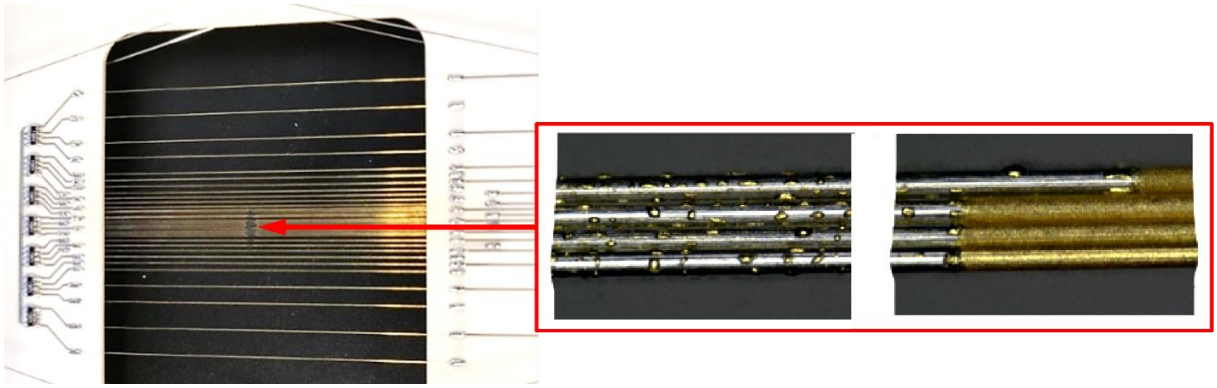


Рисунок 1.3.10 – Многопроволочный профилометр LINAC4 со слипшимися в процессе измерений позолоченными проволочками

Для увеличения полезного разрешения профилометра может использоваться схема с переменным шагом между проволочками. Подобная схема позволяет получить более высокое разрешение в центре апертуры ионопровода и при этом использовать меньшее количество проволочек для перекрытия всей апертуры, чем при постоянном шаге. При этом общее количество проволочек всё равно остается большим (несколько десятков), и использование стационарно расположенных сигнальных разъемов по аналогии с конструкциями цилиндра Фарадея или проволочного сканера представляется потенциально опасным в случае многопроволочного профилометра, т. к. жгут или лента из большого числа сигнальных проводов может некорректно изгибаться при вводе/выводе рамки профилометра, хотя и существуют примеры подобных конструкций (Рисунок 1.3.11) [59]. В связи с этим, рекомендуется использовать стандартный сильфонный ввод движения, на выходном фланце которого размещается сигнальный многопиновый разъем и отдельно разработанный шток с закрепленной на нем рамкой с проволочками.

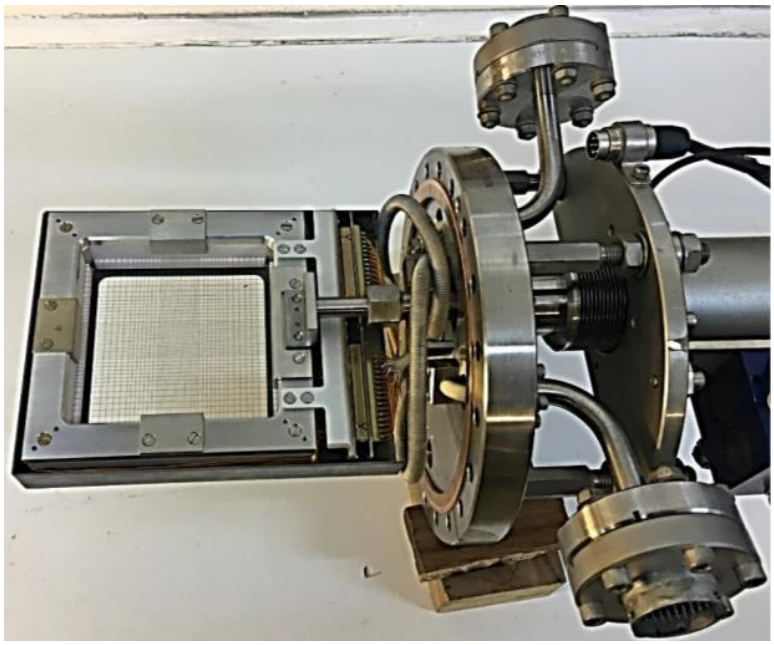


Рисунок 1.3.11 – Многопроволочный профилометр iThemba Labs с переменным шагом проволочек и стационарно расположенными сигнальными разъемами

Следует отметить, что использование подобных диагностических устройств на сильноточных низкоэнергетических пучках ионов представляется нецелесообразным по совокупности особенностей эксплуатации и изготовления:

- Ограниченный диапазон параметров пучка даже в наладочном режиме работы ускорителя из-за высоких тепловых нагрузок.
- Величина неравномерности коэффициента вторичной эмиссии разных участков проволоки, возникающая после больших или длительных нагрузок пучком, оказывается существенно большей для сетки, чем для сканера.
- Разрешение сетки ограничено расстоянием между проволочками, которое обычно составляет от 1 мм и больше (при необходимости использования системы натяжения проволочек), в то время как сканер даже в относительно простой конструкции может обладать разрешением ~100 мкм.
- Сетка требует одного измерительного канала на проволочку, что пропорционально увеличивает сложность и стоимость изготовления предусилительной и интегрирующей электроники, ориентировочная стоимость которой для современной элементной базы составляет ~ 1000 $/канал.

Профилометры на основе излучающих экранов

Профилометры на основе излучающих экранов являются исторически первыми устройствами для измерения поперечного профиля и сечения пучка. Эти диагностические устройства обладают следующими преимуществами:

- регистрация двумерного распределения частиц пучка в поперечной плоскости,
- высокое пространственное разрешение до единиц микрон,
- чувствительность от 10^4 до 10^{12} частиц в импульсе тока пучка,
- возможность относительных измерений интенсивности пучка за счет линейной зависимости световыхода материала экрана от тока регистрируемого пучка в широком диапазоне интенсивностей.

Физические принципы работы и типичные характеристики

Принципиальная схема профилометра с излучающим экраном и пример реализации показаны на рисунке 1.3.12 [68]. Пучок попадает на экран, вызывая его свечение в оптическом диапазоне, регистрируемое видеокамерой. Данный тип измерений относится к возмущающим методам, поэтому экран вводится на время измерения при помощи привода.

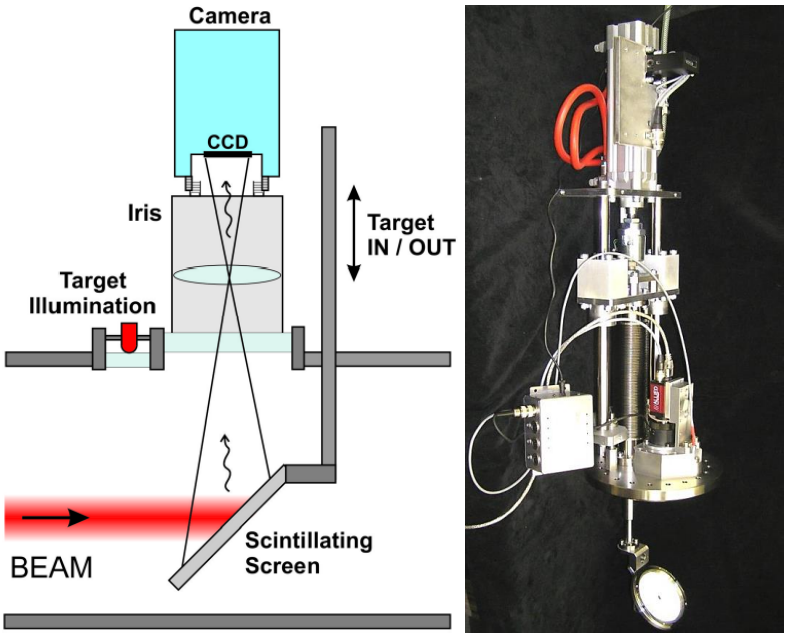


Рисунок 1.3.12 – Схема и фотография профилометра с излучающим экраном

Экраны, которые используются в подобных профилометрах, делятся на две большие группы: люминесцентные экраны (англоязычные термины: scintillating screen или fluorescent screen), работа которых основана на эффекте люминесценции материала экрана, и экраны переходного излучения (англоязычный термин: optical transition radiation (OTR) screen), продуцирующие особое переходное излучение на границе вакуум/экран.

Тип экрана, а также его характеристики определяются по совокупности физико-технических факторов. Например, для ионных ускорителей использование OTR экранов становится эффективным, начиная с энергий ~10 ГэВ [69], что обусловлено особенностями переходного излучения, распределение интенсивности которого в пространстве определяется, как:

$$\frac{d^2N}{d\omega d\Omega} = \frac{2e^2\beta^2}{\pi c} \times \frac{\theta_x^2 + \theta_y^2}{\left(\gamma^{-2} + \theta_x^2 + \theta_y^2\right)^2}, \tag{1.3.2}$$

где e – заряд электрона, β, γ – релятивистские факторы, θ_x и θ_y углы между точкой обзора и нормалью к плоскости экрана. При меньших энергиях световыход OTR экранов оказывается на порядки ниже любого люминесцентного экрана, таким образом, их использование на ионных линаках представляется нецелесообразным.

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Практическое применение на линейных ускорителях ионов нашли люминесцентные экраны, особенности реализации которых определяются в основном материалом экранов и характеристиками видеокамер.

Видеокамеры выбираются исходя из требований к разрешающей способности и радиационной стойкости. При высоком уровне радиационного фона в области установки камеры, как правило, используют локальную защиту или переносят место установки камеры в область меньших радиационных нагрузок, передавая изображение экрана через зеркально-линзовый тракт.

Основные типы экранов можно разделить по типу изготовления на следующие категории: порошковые, кристаллические и керамические.

Порошковые экраны изготавливаются путем нанесения люминесцентного порошка на металлическую подложку или клейкое основание. Разрешение такого экрана ограничивается средним размером зерна (~2÷3 мкм), однако из-за многократного рассеяния в веществе обычно составляет несколько десятков микрон. Ввиду простоты изготовления для порошковых экранов используется большое количество различных люминофоров, однако наибольшее распространение получил порошковый люминофор P43 (современный отечественный аналог – КЭП-545).

Кристаллические экраны изготавливаются путем выращивания моно- и поликристаллов из люминесцентных материалов. На данный момент большинство кристаллических экранов изготавливается из иттрий-алюминиевого граната (YAG), легированного цезием (Рисунок 1.3.13), а также йодида цезия, легированного таллием. Для кристаллов наилучшее пространственное разрешение составляет ~10 мкм и в основном определяется эффектами переотражения, зависящими от толщины получаемого экрана и чистоты кристалла, из которого он выполнен.

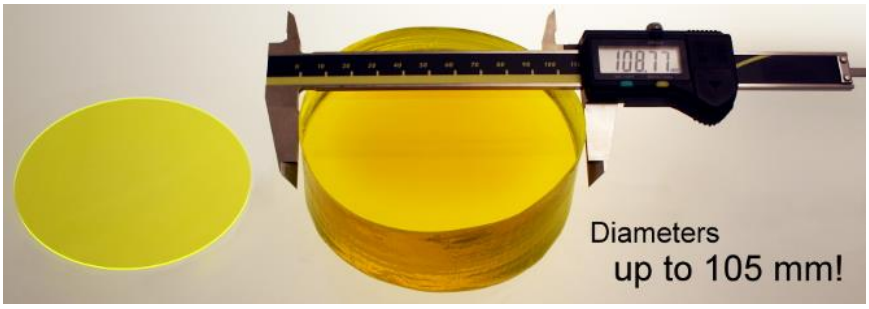


Рисунок 1.3.13 – Пример экрана из монокристалла YAG фирмы Crytur (Чехия)

Керамические экраны изготавливаются путем спекания различных керамических порошков (оксиды алюминия и циркония с различными легирующими добавками). Для таких экранов пространственное разрешение не превосходит 10 мкм и определяется размером зерен порошка. Переотражений в данном случае не возникает ввиду непрозрачности материала в оптическом диапазоне. Различия между люминофорами в основном характеризуют спектром их излучения (Рисунок 1.3.14) [70] и временем высвечивания, в течение которого интенсивность излучения спадает экспоненциально.

Спектр свечения люминофора во многом определяет выбор видеокамеры с соответствующим максимумом спектральной чувствительности для наиболее эффективного захвата изображения. В таблице 1.3.1 приведены некоторые типичные материалы люминесцентных экранов и их основные характеристики.

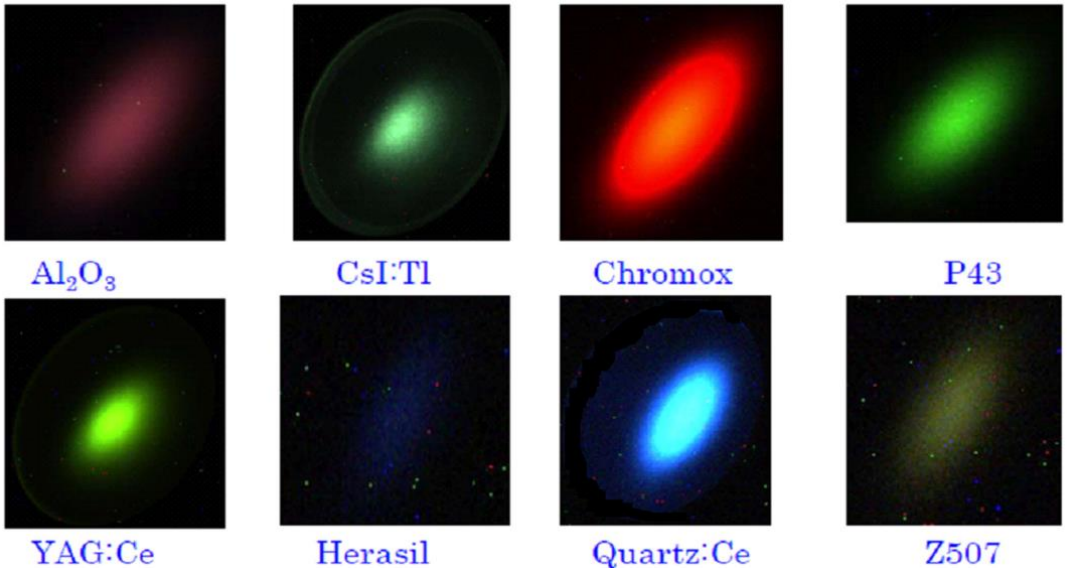


Рисунок 1.3.14 – Изображения пучка ионов урана с энергией 300 МэВ/нуклон, полученные при помощи различных люминесцентных экранов

Таблица 1.3.1 – Характеристики типичных материалов люминесцентных экранов

Название материала	**Формула**	**Тип экрана при изготовлении**	**Цвет излучения**	**Время высвечивания, мкс**
CdS:Ag	CdS:Ag	Порошковый	Зеленый	1250
Gd_2O_2S:Eu	Gd_2O_2S:Eu	Порошковый	Красный	250
P43	Gd_2O_2S:Tb	Порошковый	Зеленый	750
P47	$Y_2Si_5O_5$:Tb	Порошковый	Фиолетовый	0.1
Y_2O_2S:Tb	Y_2O_2S:Tb	Порошковый	Синий	1000
ZnS	ZnS	Порошковый	Зеленый	1250
CsI:Tl	CsI:Tl	Кристаллический	Зеленый	1
NaI:Tl	NaI:Tl	Кристаллический	Зеленый	1
YAG:Ce	$Y_3Al_5O_{12}$:Ce	Кристаллический	Зеленый	0.1
Chromox	Al_2O_3:Cr	Керамический	Красный	1000
Z507	ZrO_2:Mg	Керамический	Желтый	1000

Использование люминесцентных экранов на пучках ионов низких энергий (< 50÷100 МэВ) сопряжено с их деградацией под воздействием ионизационных потерь пучка. На рисунке 1.3.15 [70] представлено шесть керамических экранов, которые подверглись облучению пучками аргона с энергией 11.4 МэВ/нуклон и импульсным током 260 мкА. Во всех случаях произошла деградация люминофора под воздействием пучка, при этом не только неравномерно менялся световыход экрана, но и происходило изменение кристаллической решетки, приводящее к разрушению экрана (Рисунок 1.3.16).

Рисунок 1.3.15 – Керамические люминесцентные экраны до (вверху) и после (внизу) облучения 1000 импульсами пучка аргона с энергией 11.4 МэВ/нуклон и током 260 мкА

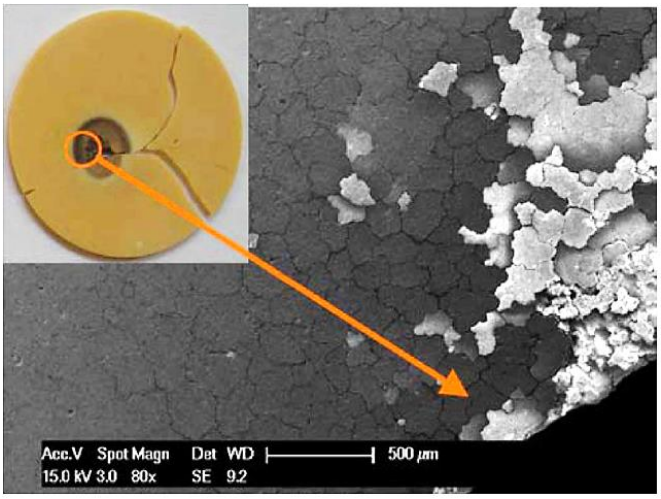


Рисунок 1.3.16 – Разрушение экрана из оксида циркония как результат деградации

Для большинства материалов люминесцентных экранов световыход зависит линейно от количества частиц в пучке в широком диапазоне интенсивностей (Рисунок 1.3.17) [70]. В этом случае профилометр можно использовать как измеритель интенсивности пучка при условии его предварительной калибровки по какому-либо абсолютному датчику тока, например, ИДТ или ЦФ [71]. Однако для низкоэнергетических и/или высокоинтенсивных ускорителей ионов данный тип измерений можно рассматривать исключительно в качестве вспомогательного, т. к. непредсказуемая деградация экрана под воздействием регистрируемого пучка может существенно искажать результат измерений.

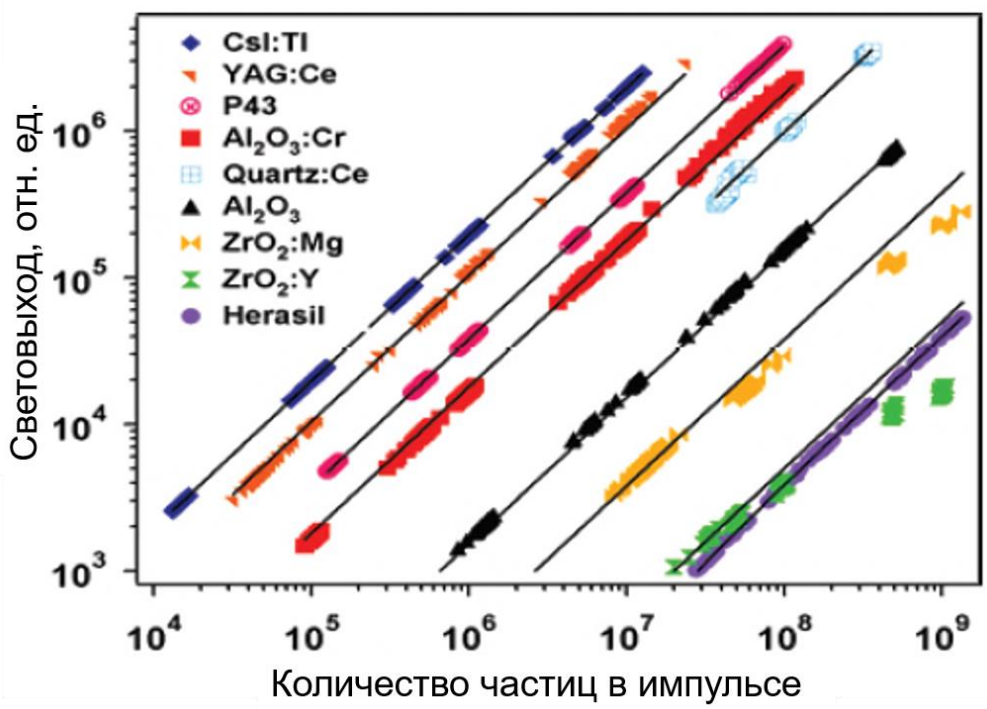


Рисунок 1.3.17 – Измеренная зависимость световыхода люминофоров от интенсивности падающего пучка ионов урана с энергией 269 МэВ/нуклон

Ионизационные мониторы и профилометры

Проволочные сканеры, многопроволочные профилометры и, тем более, люминесцентные экраны относятся к классу возмущающих, а при низких энергиях пучка, разрушающих устройств диагностики, использование которых для непрерывного контроля параметров ионного пучка ограничено, как существенным возмущением пучка в процессе измерений, так и деградацией детектора под действием радиационных и тепловых нагрузок. В связи с этим, для целей непрерывного контроля профиля пучка и других получаемых на его основе параметров предпочтение отдается неразрушающим методам диагностики, в частности, методам на основе ионизации остаточного газа в ионопроводе ускорителя.

Физические принципы работы и типичные характеристики

Ускоренные заряженные частицы, проходя по каналу транспортировки пучка, вызывают ионизацию остаточного газа. Число образовавшихся ионов в единице объема прямо пропорционально интенсивности пучка и давлению остаточного газа. Регистрируя образовавшиеся ионы и/или электроны и анализируя их распределение, можно осуществлять процедуры неразрушающей диагностики, в частности, проводить измерения профилей и положения пучка.

Первые детекторы, использующие явление ионизации остаточного газа, начали разрабатываться для диагностики пучков в середине 60-х годов [72], и в дальнейшем, в англоязычной литературе они получили название RGM (Residual Gas Monitor) или, более устоявшееся, IPM (Ionization Profile Monitor). На данный момент ионизационные профилометры используются на многих ускорителях протонов и тяжелых ионов для диагностики пучков с характерными поперечными размерами от миллиметра до нескольких сантиметров.

Следующим этапом развития ионизационной диагностики стали ионизационные мониторы, позволяющие наблюдать в явном виде реальное двумерное поперечное сечение пучка, аналогично люминесцентным экранам, а не

отдельные профили, как в одномерных или двумерных профилометрах. Пространственное распределение продуктов ионизации анализируется одновременно в двух плоскостях. Проанализированные таким двумерным образом ионы и/или электроны регистрируются каким-либо коллектором, а полученный сигнал усиливается и передается в обрабатывающую электронику, где в дальнейшем представляется в виде двумерного поперечного сечения пучка для последующего анализа.

Фактически с помощью ионизационных мониторов измеряется двумерное поперечное распределение плотности частиц пучка $L(x, y, t) = \iint \rho(x, y, z, t) dz dt$, где x, y – поперечные координаты, z – продольная, t – время. Путем интегрирования измеряемого двумерного распределения по одной из поперечных координат может быть найден профиль пучка по другой поперечной координате, аналогичный профилям, измеряемым, например, с помощью проволочных сканеров или одномерных ионизационных профилометров. При этом обработка результатов измерений двумерного поперечного распределения позволяет определить положение центра пучка, а в сочетании с элементами фокусирующего канала, осуществляющими линейное преобразование в поперечном фазовом пространстве, монитор может быть использован для процедуры восстановления поперечного эмиттанса пучка.

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Несмотря на широкую распространенность, из-за большого разброса параметров пучков не существует единой «стандартной конфигурации» ионизационного профилометра. В случае же двумерных мониторов такие устройства в принципе изготовлены в единичных экземплярах всего в нескольких лабораториях.

Например, для неразрушающей диагностики поперечных профилей и относительной интенсивности пучка на циклотроне У400М в ЛЯР ОИЯИ создан ионизационный монитор, устойчивый к высоким радиационным нагрузкам [73].

Принцип работы данного детектора основан на регистрации ионной составляющей остаточного газа. Оригинальная конструкция, позволяющая регистрировать двумерное распределение пучка, изображена на рисунке 1.3.18. Детектор состоит из трех основных частей: экстрактор; сканер и анализатор. Экстрактор используется для извлечения и ускорения образовавшихся ионов, которые приобретают кинетическую энергию пропорционально пройденному пути. Сканер и анализатор используются для выделения заданной энергии, приобретаемой ионами в процессе движения от места ионизации до коллектора.

Прохождение ионов с заданной энергией через анализатор и узкую щель коллектора (1 мм) позволяет выделить ионы, образовавшиеся в заданной координате вдоль одного выбранного направления. Сканирование всей анализируемой области достигается путем изменения напряжений на сканере и анализаторе. Монитор имеет два независимых анализатора, размещенных последовательно, что позволяет измерять поперечные профили пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях.

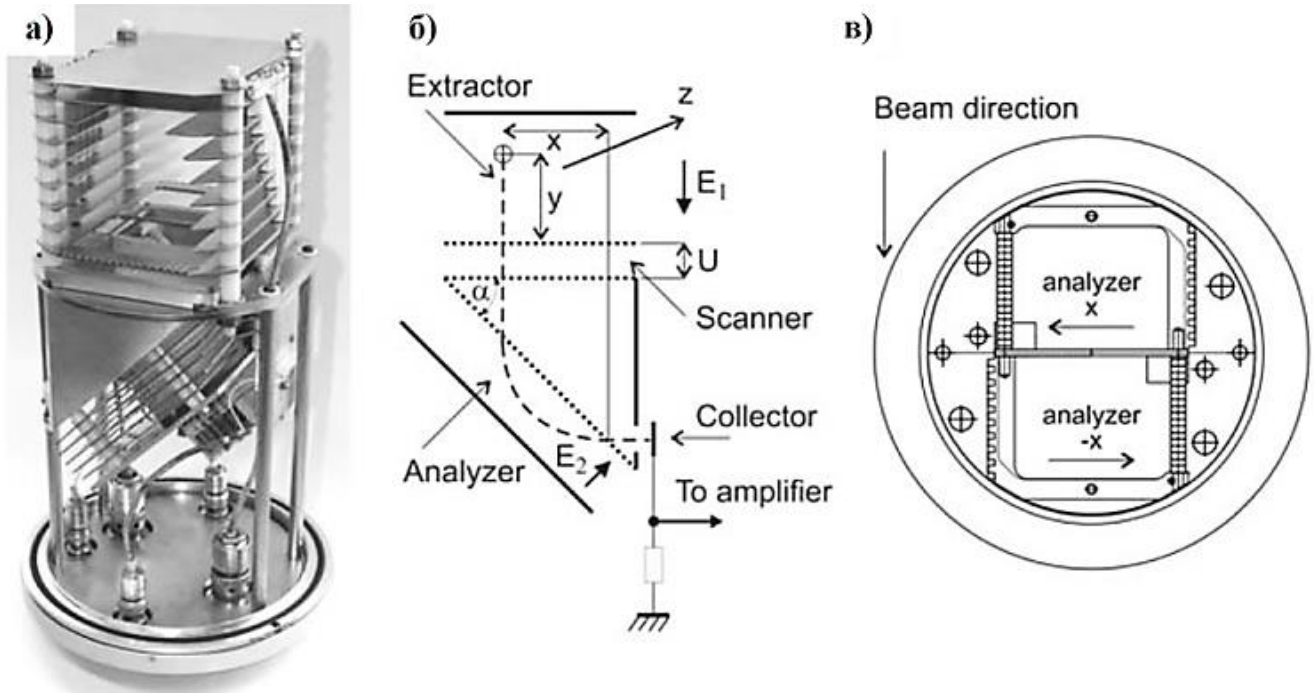


Рисунок 1.3.18 – Фотография и схема ионизационного монитора в ЛЯР ОИЯИ

Другим примером устройства, работающим по принципу двумерного монитора, является детектор, разработанный совместно лабораториями iThemba LABS и INFN (Рисунок 1.3.19) [74]. Образовавшиеся ионы остаточного газа ускоряются в извлекающем электростатическом поле и проходят через щель шириной 1 мм в направлении пучка. Два цилиндрических электрода создают электростатическое поле, которое поворачивает траекторию ионов примерно на 90º. В результате ионы попадают на поверхность МКП и воспроизводят двумерное поперечное сечение первичного пучка.

Процесс формирования двумерного поперечного сечения пучка заключается в том, что ионы, родившиеся дальше от щели, получают дополнительное ускорение и, поскольку их энергия оказывается больше, отклоняются слабее в анализирующем поле. Таким образом, вертикальное распределение частиц по сечению пучка восстанавливается за счет анализа вторичных ионов по энергиям, а горизонтальное распределение передается без изменения, аналогично одномерным ионизационным профилометрам. В качестве позиционно-чувствительного собирающего детектора на выходе МКП был выбран коллектор из 40 вертикальных и 40 горизонтальных каналов, т. е. итоговым результатом измерений являются два одномерных профиля.

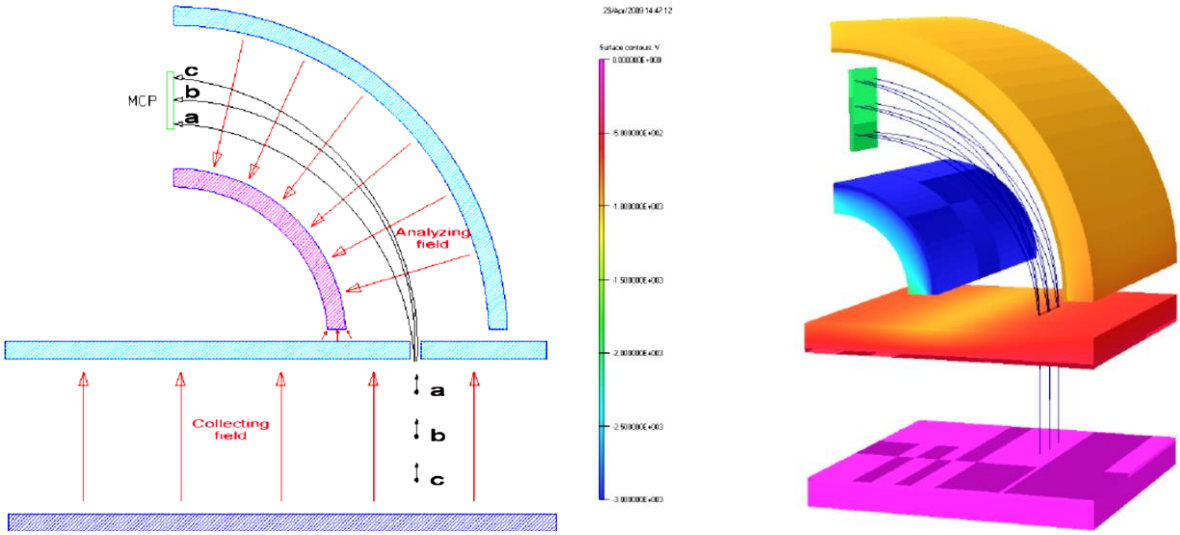


Рисунок 1.3.19 – Распределение полей и 3D-модель монитора iThemba LABS

Ещё одним примером реализации ионизационного монитора является так называемый ионизационный монитор поперечного сечения (ИМПС) (устоявшееся англоязычное название: BCSM – beam cross-section monitor), базовые конфигурации и принципы работы которого была изначально предложены в НИЦ «Курчатовский институт» [75, 76], однако уже более 15 лет применяются и развиваются только на ЛУ ИЯИ РАН [77]. ИМПС, установленный на выходе ЛУ (Рисунок 1.3.20), обеспечивает проведение неразрушающей диагностики во всём диапазоне параметров ускорителя (Рисунок 1.3.21).

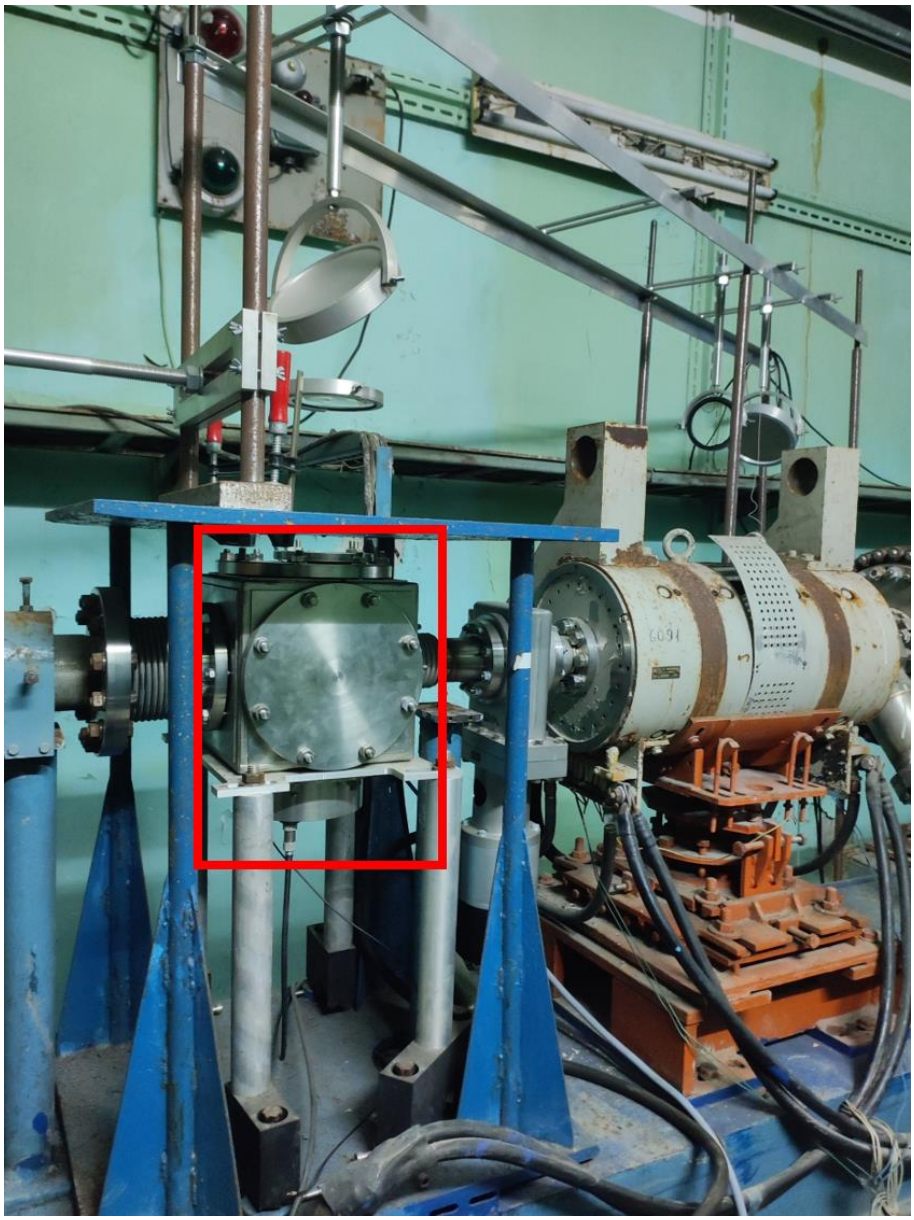


Рисунок 1.3.20 – ИМПС (в красной рамке) на выходе ЛУ ИЯИ РАН

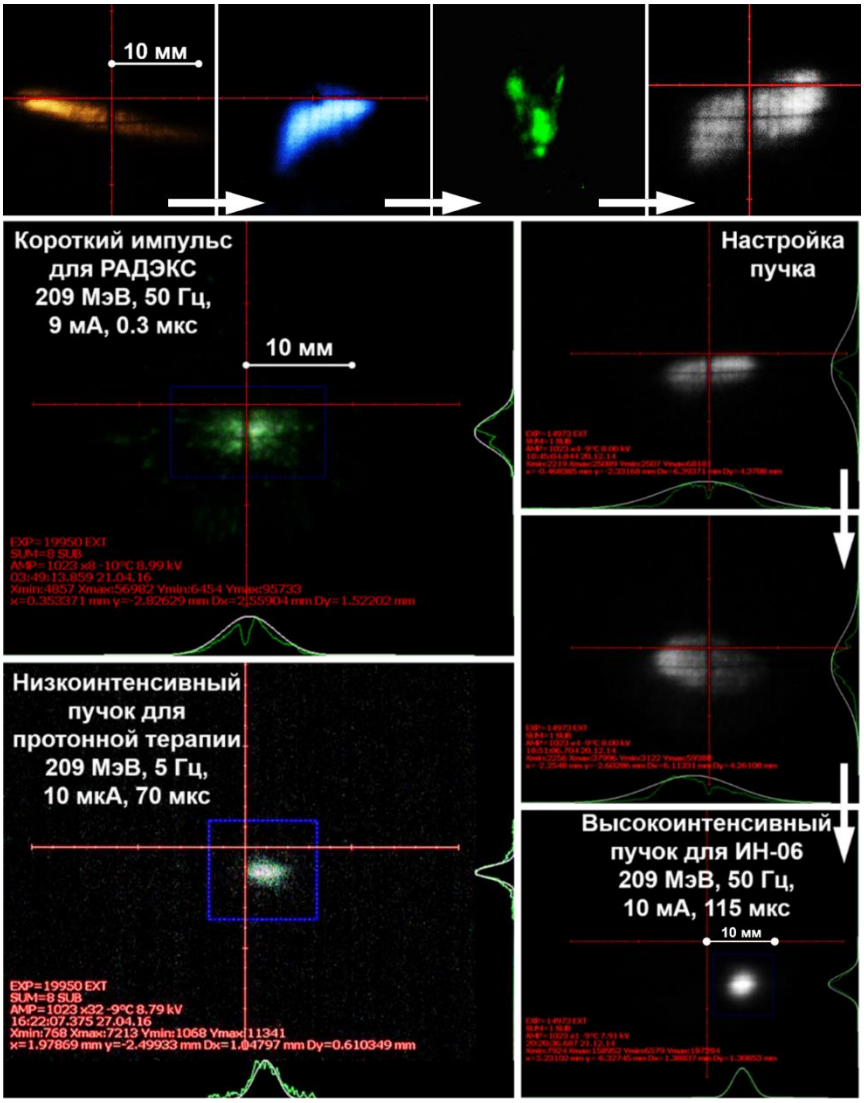


Рисунок 1.3.21– Примеры наблюдаемых на ИМПС поперечных сечений пучка во время настройки (процесс показан белыми стрелками) и при стандартной работе ЛУ ионов водорода на различные экспериментальные установки ИЯИ РАН

Принцип работы монитора подробно изложен в [77] и поясняется на рисунке 1.3.22. Исследуемый первичный пучок протонов проходит через область квазиоднородного электростатического поля E_{ex} экстрактора, формируемого плоскими электродами 1 и 2, находящихся под потенциалами соответственно: 0 В и до –10 кВ, и взаимодействует с молекулами остаточного газа. Образующиеся вторичные положительные ионы движутся в этом извлекающем поле перпендикулярно направлению распространения пучка и проходят через щель шириной $L_{щель}$ = 0.5 ÷ 1 мм по оси Z, образуя ленточный пучок.

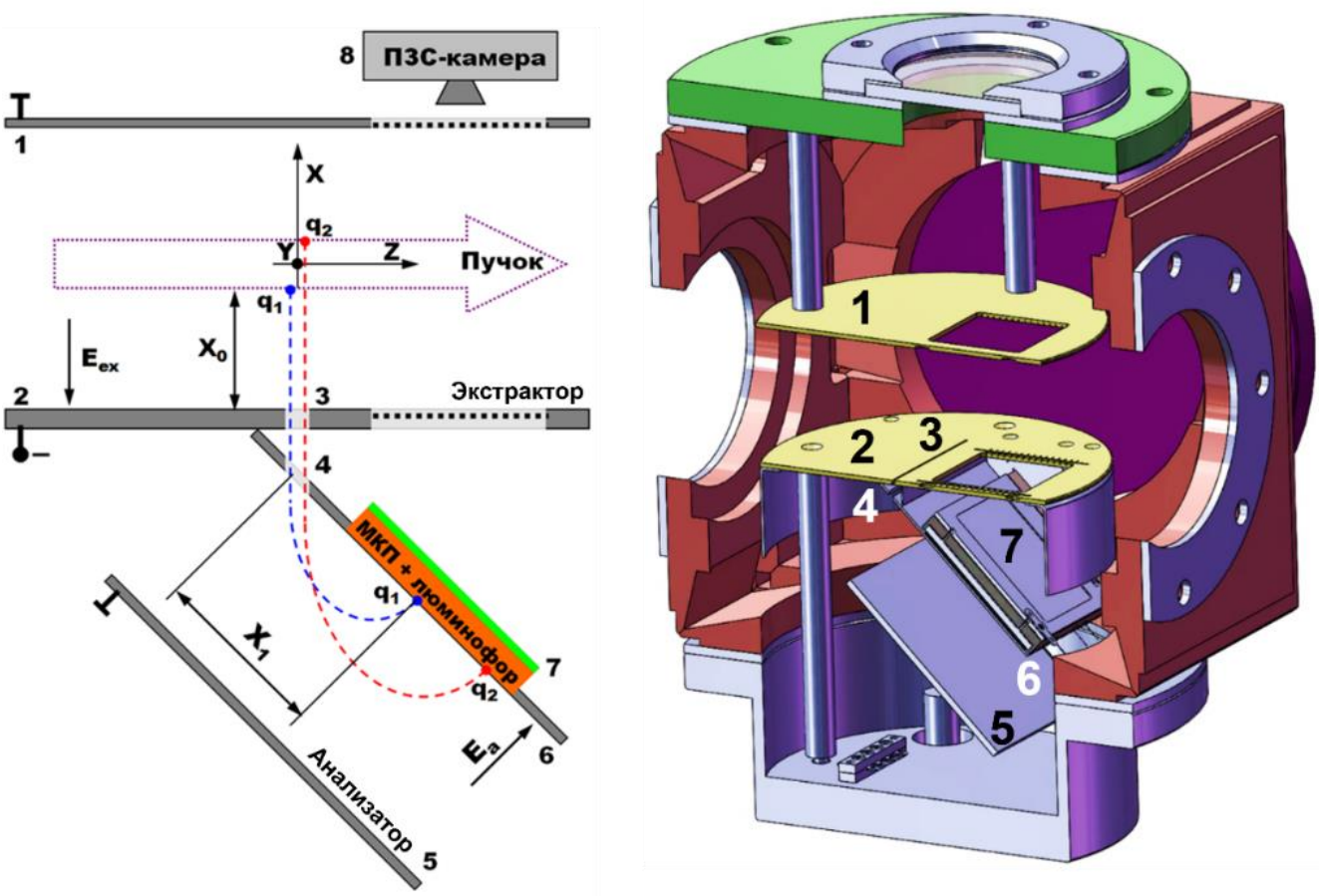


Рисунок 1.3.22 – Базовая конфигурация и трехмерная модель ИМПС

Ионы q1 и q2, образовавшиеся в точках пространства с разными координатами X_0, при прохождении щели имеют разную энергию, поэтому распределение ионов по энергиям в ленточном пучке соответствует распределению частиц в исследуемом первичном пучке по оси X. При этом распределение по координате Y совпадает с распределением плотности частиц в первичном пучке, как в одномерных ионизационных профилометрах.

Далее ленточный пучок вторичных ионов проходит через щель 4, имеющую в направлении оси Z размер, равный размеру щели 3, и попадает в квазиоднородное электростатическое поле E_a анализатора по энергиям, формируемое плоскими электродами 5 и 6, установленными под углом 45°. Потенциал электрода 6 равен потенциалу электрода 2, а электрод 5 заземлен, как и электрод 1.

В зависимости от энергии ионы попадают на вход электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 7 с различным смещением X_1 относительно щели 4. ЭОП состоит из шевронной сборки микроканальных пластин с усилением до 10^6 и люминесцентного экрана, на котором и формируется двумерное оптическое изображение поперечного сечения исследуемого пучка. Входная поверхность МКП ЭОП расположена в плоскости поверхности электрода 6 и имеет такой же потенциал. Изображение поперечного сечения регистрируется с помощью ПЗС-видеокамеры 8 и далее обрабатывается с помощью специализированного ПО.

Распределение плотности потока частиц исследуемого пучка однозначно преобразуется в распределение плотности потока ионов в плоскости МКП. Можно показать, что в случае однородных электростатических полей расстояние X_0 от точки образования иона до щели 3 и расстояние X_1 от щели 4 до точки попадания иона на вход МКП связаны соотношением $X_1=2X_0(E_{ex}/E_a)$.

При выполнении условия $E_a/E_{ex}=\sqrt{2}$ регистрируемое камерой изображение на люминофоре повторяет распределение частиц в поперечном сечении исследуемого пучка, и так как результат не зависит от массы и заряда извлекаемых частиц, то все сорта образовавшихся молекулярных ионов остаточного газа дают вклад в формирование этого изображения.

Особым требованием является необходимость проведения измерений в наладочном режиме ускорителя, когда потери пучка на начальном этапе настройки могут достигать 10% и более. В этом случае распределение интенсивности пучка в поперечном сечении может быть достаточно сложной формы.

Многолетний опыт работы с ИМПС на ЛУ ИЯИ РАН показал, что для хорошо настроенного пучка форма его поперечного сечения близка к эллиптической и стабильна во времени. Неизменность формы и положения, как правило, свидетельствуют об устойчивой работе ускорителя, поэтому ионизационные мониторы, помимо использования для основных диагностических задач по измерению профилей и положения пучка, являются эффективными инструментами для обобщенного контроля качества проводки пучка.

Профилометр на основе свечения остаточного газа (флуоресцентный монитор)

Физические принципы работы и типичные характеристики

Базовый принцип работы датчика основан на том, что, двигаясь по ионопроводу, пучок вызывает свечение остаточного газа в широком спектре. Так как время жизни возбужденных состояний молекул и атомов остаточного газа составляет $\sim 10 \div 100$ нс, то данное свечение относится к флуоресценции, что отражено в англоязычном названии датчика – Beam Induced Fluorescence monitor (BIF-monitor), а русскоязычным эквивалентом может считаться название «флуоресцентный монитор» (ФЛУМ).

Свечение газа вызвано как первичным взаимодействием пучка с газом, так и вторичными электронами, образующимися в результате ионизации газа. Основной вклад в свечение, вызванное высокоэнергичными частицами пучка, вносят ионизация и диссоциация газа, в результате которых образуются атомы газа в возбужденном состоянии, которые в дальнейшем испускают фотоны при переходе в основное состояние, а также свой вклад вносит первичное возбуждения нейтральных молекул остаточного газа, в то время как вторичные электроны вызывают свечение, за счет возбуждения нейтральных молекул [78] и рекомбинации с ионами, сопровождающейся образованием нейтральных молекул в возбужденном состоянии и последующим испусканием фотонов [79].

На рисунке 1.3.23 (а) изображена базовая схема ФЛУМ: часть фотонов, прошедшая через окно, фокусируется оптической системой на ПЗС матрицу. По распределению фотонов, попавших на матрицу, восстанавливается поперечный профиль и положение пучка. Кроме того, часто между окном и ПЗС камерой ставят электронно-оптический преобразователь (ЭОП) для усиления сигнала, а также устанавливают оптический фильтр перед объективом для выделения излучения с определенными длинами волн. При энергиях протонов больше ~ 80 кэВ ионизационные потери снижаются, уменьшая число рождаемых фотонов.

В таком случае для измерения профиля локально впрыскивают газовую струю под высоким давлением, а также используют усилители изображения (Рисунок 1.3.23 (б)). На рисунке 1.3.24 [80] приведён пример измерения профиля с помощью ФЛУМ без напуска дополнительного газа.

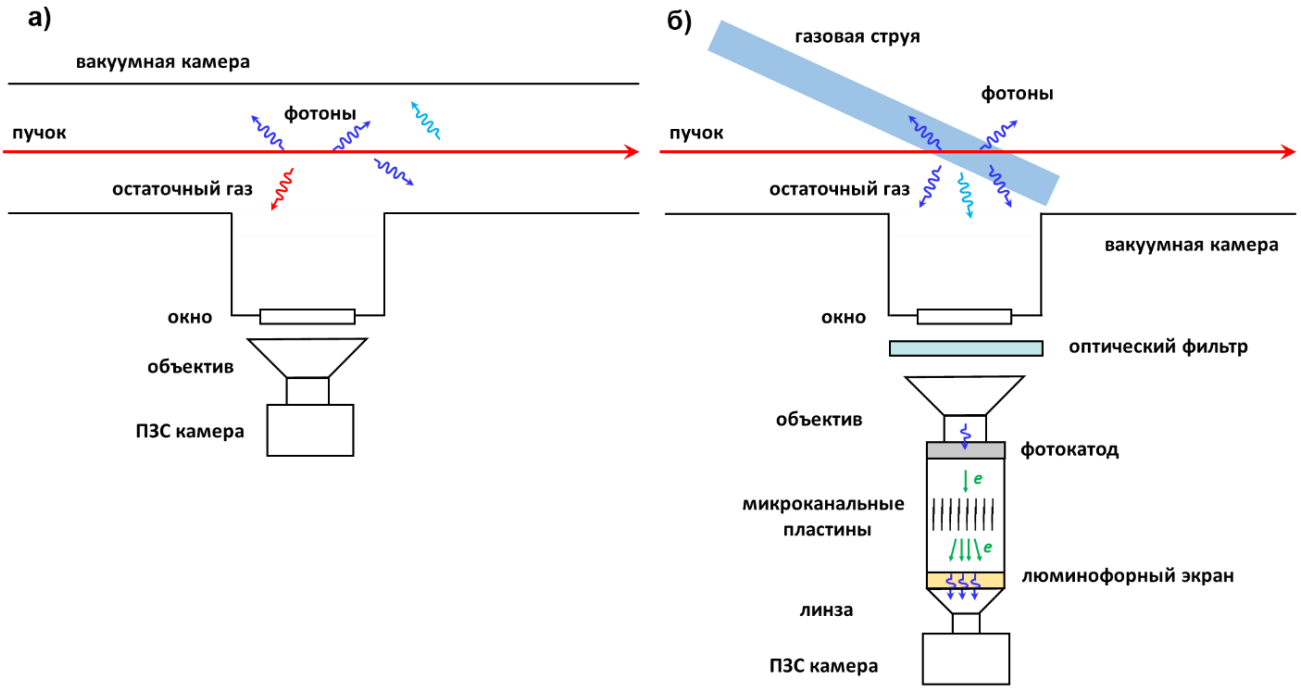


Рисунок 1.3.23 – Схематичное устройство: а) базовой конфигурации ФЛУМ и б) конфигурации с газовой струей и усилителем изображения

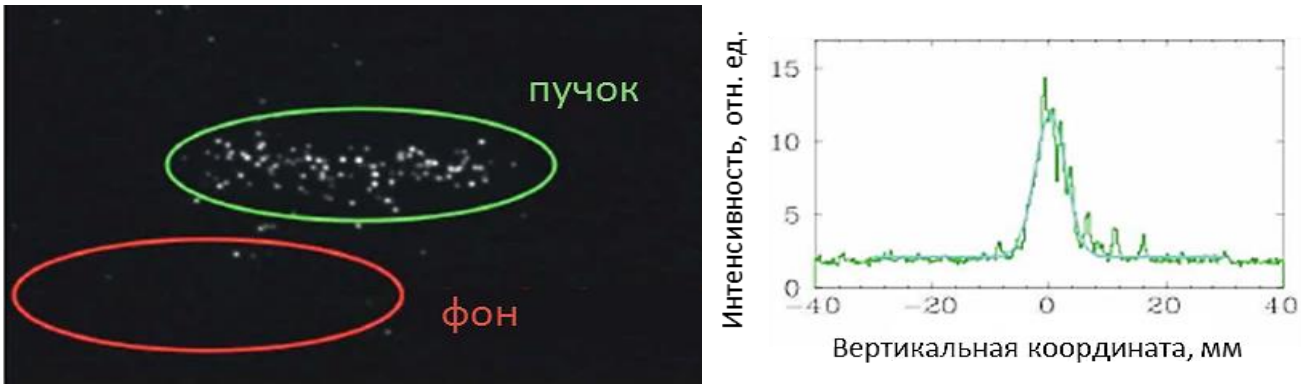


Рисунок 1.3.24 – Регистрируемое изображение и профиль пучка ЛУ GSI 4.7 МэВ U^{28+}, ток 0.7 мА в импульсе длительностью 200 мкс, давление 10^{-5} мбар

Спектр свечения определяется составом остаточного газа. В случае линейных ускорителей ионов остаточный газ преимущественно состоит из паров воды и водорода. Также при совместном использовании масляных форвакуумных насосов и магниторазрядных насосов в остаточном газе может присутствовать угарный газ (CO) и метан (CH_4) из-за попадания масляных паров в разрядные ячейки. Например, типичный состав остаточного газа в ЛУ ИЯИ РАН представлен на рисунке 1.3.25. Остаточный газ преимущественно состоит из паров воды (H_2O ~ 40%), водорода (H_2 ~ 18%), азота (N_2 ~7%), угарного газа (CO ~7%) и метана (CH_4 ~ 10%).

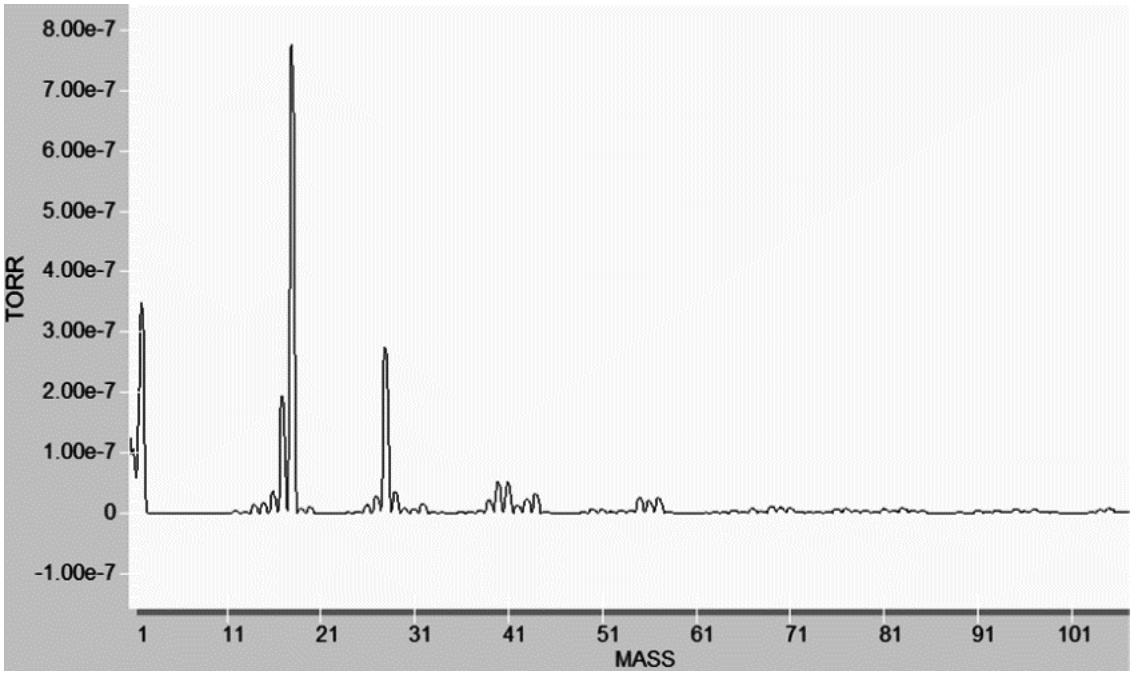


Рисунок 1.3.25 – Типичный масс-спектр состава остаточного газа в ЛУ ИЯИ РАН

Основные линии в спектре излучения паров воды, лежащие в видимом диапазоне, соответствуют линиям Бальмера [81, 82]. Помимо них в спектре присутствуют ярко выраженные линии излучения OH в ультрафиолетовой (УФ) части спектра и линии излучения O^+. В спектре излучения молекулярного водорода H_2 также ярко выражены линии Бальмера [83], соответствующие диссоциации молекулярного водорода с дальнейшим оптическим переходом атомарного водорода из возбужденного состояния.

В случае использования напуска дополнительного газа чаще всего выбирают азот, либо ксенон [84]. Азот выбирают из-за большого сечения процессов, приводящих к свечению в оптическом диапазоне, а ксенон из-за меньшего времени жизни возбужденного состояния. Главные максимумы излучения азота соответствуют излучению возбужденных ионов N_2^+, лежащих в фиолетовой части спектра и нейтральных молекул N_2 лежащих в УФ-диапазоне [85, 86].

Количество рождаемых фотонов определяется ионизационными потерями пучка. В случае, если известны сечения процессов, приводящих к свечению, число фотонов может быть найдено по формуле 1.3.3 [87]:

$$N_\gamma \approx \sigma \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot \Delta t}{q \cdot e} \cdot n \cdot L\,,$$	(1.3.3)

где Ω – телесный угол регистрации свечения, $\sigma -$ сечение процесса излучения фотонов, $I -$ ток пучка, $\Delta t -$ длительность импульса, $q -$заряд частиц, $e -$ заряд электрона, $n -$ концентрация молекул остаточного газа, $L -$ длина наблюдения.

Также для оценки можно считать, что на излучение в оптическом диапазоне затрачивается энергия равная ~1% ионизационных потерь пучка.

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Основными эффектами, влияющими на разрешение, точность и чувствительность ФЛУМ, являются:

- Пространственное разрешение светочувствительной матрицы.

  Размер пикселей ПЗС-матриц составляет $3 \div 15$ мкм, а их плотность и линейное увеличение объектива определяют минимально возможное пространственное разрешение ФЛУМ, характерное значение которого составляет сотни мкм/пиксель.

- Конечное время жизни возбужденного уровня.

  Возбужденные атомы и молекулы газа, двигаясь с тепловыми скоростями, успевают сместиться на сотни микрон до испускания фотонов, что приводит к уширению видимого профиля.

- Глубина резкости.

  Так как пучок имеет конечную ширину и может смещаться относительно фокальной плоскости объектива, то для его корректной обработки глубина резкости изображаемого пространства (ГРИП) должна быть больше диаметра пучка, в противном случае это приведет к размытию получаемого изображения. При фиксированной геометрии и размере матрицы глубина резкости падает с ростом апертуры, в то время как собираемый сигнал пропорционален телесному углу и растёт с ростом апертуры.

- Пространственный заряд пучка

  Пространственный заряд пучка влияет на движение ионов и вторичных электронов, что также приводит к смещению частиц относительно места взаимодействия с пучком.

- Вторичные электроны

  Вторичные электроны существенно искажают измеряемый профиль при работе с давлениями остаточного газа $10^{-3} \div 10^{2}$ мбар, из-за того, что при этих давлениях длина свободного пробега электронов в газе может достигать нескольких миллиметров, что приводит к уширению измеряемого профиля. При работе с меньшими давлениями доля фотонов, обусловленная вторичными электронами мала, а при больших давлениях уменьшается длина пробега электронов и, как следствие, сокращается уширение профиля.

- Дробовой шум фотонов

  Ещё одним источником ошибок служит случайное число зарегистрированных фотонов. Детектирование конечного количества фотонов приводит к тому, что измеряемый профиль может не соответствовать реальному распределению частиц в пучке. При этом, как известно из статистики, погрешность измерения математического ожидания (положение пучка) и среднеквадратичного отклонения (размер пучка) падает

с ростом количества измерений (число регистрируемых фотонов) как $\frac{1}{\sqrt{N}}$. Отсюда следует, что для измерения ширины и положения пучка с точностью, например, ~3% нужно детектировать ~1000 фотонов, что накладывает ограничения на геометрию детектора, оптическую систему и рабочее давление в камере.

- Шумы фоточувствительной матрицы

Основными источниками шумов в фоточувствительной матрице являются темновой шум и шумы предусилителя, а также горячие пиксели.

Темновой шум преимущественно вызван термогенерацией электрон-дырочных пар на поверхности и в обеднённом слое МОП и в меньшей степени – диффузией неосновных носителей из областей, примыкающих к обедненному слою. Темновой шум существенно зависит от температуры, из-за чего в случае неравномерного прогрева матрицы шумы существенно зависят от координаты. Для борьбы с этим источником шума следует охлаждать матрицу.

Шум считывающей электроники возникает при преобразовании заряда, накопленного на ПЗС матрице в напряжение, основной вклад в этот источник шума вносит предусилитель. Данный шум равномерно искажает значение всех пикселей изображения.

Ещё одним источником ошибок являются горячие пиксели, выдающие завышенный сигнал из-за своего нагрева. Горячие пиксели приводят к появлению ярких точек на изображении и появляются только при длительных экспозициях. Избавиться от горячих пикселей можно с помощью программной постобработки изображения.

Альтернативой ПЗС матрицам являются КМОП-матрицы, основное отличие которых заключается в том, что заряд, накопленный каждым пикселем преобразуется в напряжение и усиливается непосредственно на этом же пикселе, а уже после этого передается на вывод, что позволяет считывать

сигнал не со всей матрицы, а только с определенных пикселей, но приводит к большему уровню шумов по сравнению с ПЗС-матрицами. Также размеры пикселя в этом случае приходится увеличивать: так характерный размер пикселя ПЗС-матрицы 5÷15 мкм, в то время как у КМОП 15÷20 мкм. Таким образом, в среднем КМОП-камеры обладают не только более высоким уровнем шумов, но и худшим пространственным разрешением, что делает нежелательным использование КМОП-камер для ФЛУМ.

- Фон

Одним из критических условий для проведения измерений параметров пучка по свечению остаточного газа является минимизация различного рода светового фона. В частности, следует полностью исключить внешнюю засветку от осветительных приборов в помещении ускорителя и, по возможности, уменьшить переотражения от стенок вакуумной камеры детектора. Кроме того, для удаления теплового излучения элементов детектора и ионопровода, которое достаточно эффективно регистрируется ПЗС-матрицами, желательно устанавливать на объектив видеокамеры режекторный ИК-фильтр, в противном случае, контрастность регистрируемого изображения будет мала даже при больших значениях тока пучка. Еще одним источником фона являются потери пучка, т. к. усилитель изображения и ПЗС-матрица камеры оказываются достаточно чувствительны как гамма-квантам, так и к нейтронам, возникающим в процессе взаимодействия частиц ореола пучка со стенками ионопровода. реагирует не только на фотоны, но и на нейтроны, которые могут образовываться при попадании частиц в ловушку пучка или на стенки камеры. Для увеличения соотношения сигнал/шум можно использовать как напуск дополнительного объема газа, так и «газовую струю» – как правило, сверхзвуковой поток газа из сопла специальной конфигурации.

При классической работе детектора на основе свечения остаточного газа конечное время жизни возбужденного состояния приводит к тому, что молекулы газа успевают переместиться на некоторое расстояние до испускания фотона, что приводит к уширению видимого профиля пучка. Для количественной оценки уширения можно считать, что возбужденные атомы движутся с тепловой скоростью $V_{\text{тепл}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$ и обладают временем жизни τ, тогда среднее уширение профиля в первом приближении равно:

$$\Delta X = \left\langle \sqrt{x^2 + y^2} \right\rangle = V_{\text{тепл}} \int_0^{\pi} \frac{1}{\pi} sin\theta \, d\theta \int_0^{\infty} e^{-t/\tau} \, dt = \frac{2}{\pi} V_{\text{тепл}} \, \tau \qquad (1.3.4)$$

Типичный пример системы для регистрации профиля пучка по свечению остаточного газа показан на рисунке 1.3.26 [80].

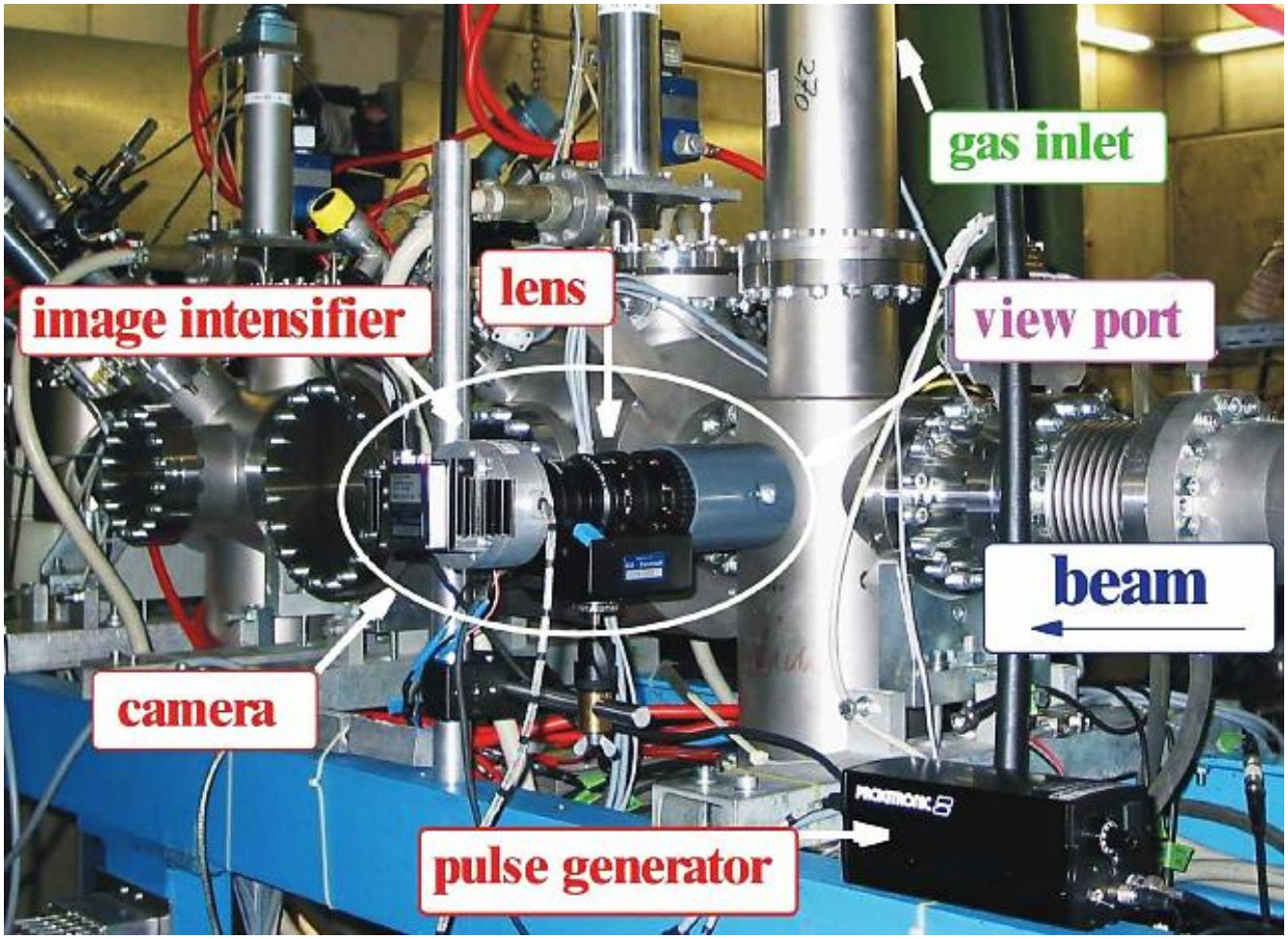


Рисунок 1.3.26 – Профилометр по свечению остаточного газа на UNILAC GSI

Для подавления переотражения фотонов стенки камеры покрыты графитовым лаком. Свечение собирается через дистанционно управляемый объектив с фокусным расстоянием 7.5÷105 мм и попадает на стандартный усилитель изображения: фотокатод с квантовой эффективностью ~25-30% и шевронная сборка МКП с усилением до 10^6.

Кроме того, в данной системе реализована возможность быстро (~100 нс) переключать напряжение между фотокатодом и входом МКП, регулируя время экспозиции для наблюдения продольной структуры макроимпульсов тока пучка. На рисунке 1.3.27 показаны результаты 8 последовательных измерений с временем экспозиции 40 мкс вдоль макроимпульса тока пучка в сравнении с данными индукционного датчика тока [80].

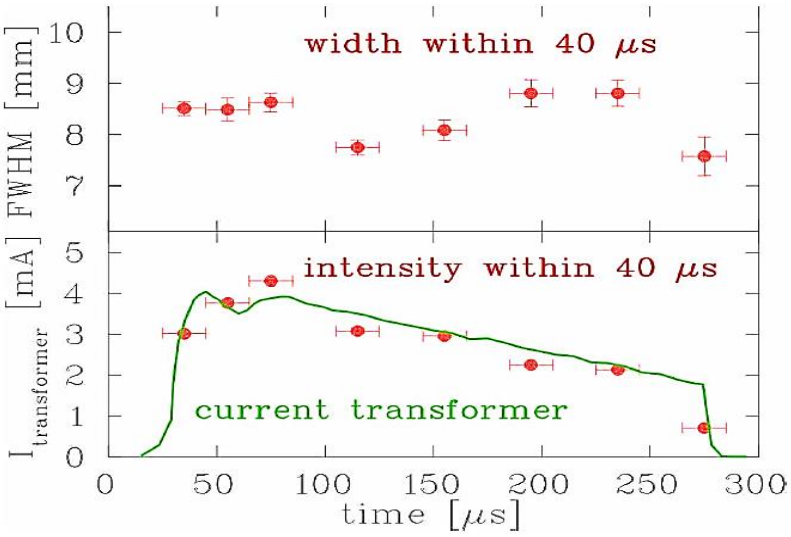


Рисунок 1.3.27 – Измеренный размер пучка вдоль макроимпульса тока и нормированная зависимость интенсивности свечения от тока вдоль макроимпульса

1.4 Поперечный эмиттанс пучка

В общем случае параметры пучка описываются функцией распределения в шестимерном фазовом пространстве $\Phi(x, p_x, y, p_y, s, E)$, где x, y, s – координаты, p_x, p_y – проекции импульса пучка на соответствующие оси, E – энергия пучка. Проекции импульса могут быть заменены на угловые расхождения x', y'. Отдельно выделяют проекции фазового пространства на поперечные фазовые плоскости (x, x'), (y, y') и продольную плоскость (s, E). Исследование распределения частиц в поперечных фазовых плоскостях необходимо для моделирования динамики пучка при помощи различных транспортных кодов. Часто для описания динамики частиц на фазовой плоскости используется эквивалентный фазовый эллипс (или просто фазовый эллипс), огибающий распределение частиц (Рисунок 1.4.1), размеры и форма которого задаются параметрами Твисса α, β, γ и поперечным эмиттансом ε:

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi} \iint dx dx'. \tag{1.4.1}$$

Параметры Твисса связаны следующим соотношением

$$\beta\gamma - \alpha^2 = 1, \tag{1.4.2}$$

Тогда среднеквадратичный размер пучка σ выражается как

$$\sigma = \sqrt{\beta\varepsilon}. \tag{1.4.3}$$

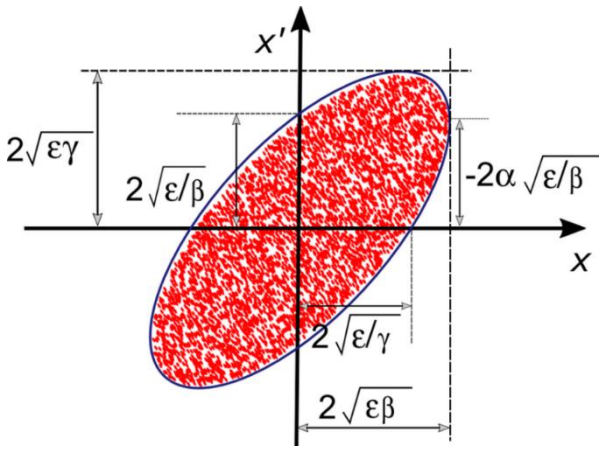


Рисунок 1.4.1 – Распределение частиц (красные точки) на фазовой плоскости, эквивалентный фазовый эллипс (синий) и взаимосвязь параметров Твисса

Существует два принципиально разных способа измерения поперечного эмиттанса: при помощи специальных измерителей эмиттанса или с использованием косвенных процедур восстановления эмиттанса. Первый способ подходит для измерений параметров пучков низких (до десятка МэВ) энергий. Измерения данным способом проводятся при помощи электростатических, диафрагмированных и щелевых измерителей эмиттанса. Второй способ можно применить и к пучкам высоких (более десятка МэВ) энергий. К косвенным процедурам восстановления относятся метод трех профилометров и метод квадрупольной вариации.

В частности, следует отметить, что обработка результатов измерений и ФЛУМ, и ИМПС даёт не только размер, но и положение пучка, при условии соответствующей юстировки вакуумной камеры конкретного устройства. Кроме того, неразрушающие измерения профиля, в сочетании с линейным преобразованием фазового портрета пучка в поперечном фазовом пространстве за счёт варьирования полей в элементах фокусирующего канала, могут быть использованы для косвенной процедуры восстановления поперечного эмиттанса.

Томографическая реконструкция эмиттанса представляется наиболее перспективным способом измерения параметров поперечного фазового портрета пучка, позволяющим изучить внутреннюю структуру распределения частиц в фазовом пространстве без использования стандартных измерителей эмиттанса, использование которых может быть невозможно по причине больших тепловых нагрузок или высокой энергии пучка.

Отличительной чертой практической реализации метода томографии поперечного фазового портрета на линейном ускорителе ИЯИ РАН [8] является использование SART алгоритма с дополнительной процедурой по устранению математических артефактов, основанной на сравнении динамики восстановленного фазового портрета с исходными данными о профилях пучка. Данная методика подробно изложена в диссертации [71] А. И. Титова (ИЯИ РАН), выполненной в 2021-2025 гг. в ИЯИ РАН под научным руководством автора.

По итоговому фазовому портрету с устраненными артефактами строится огибающий фазовый эллипс, для которого рассчитываются значения параметров Твисса и поперечного эмиттанса пучка (Рисунок 1.4.2) [71].

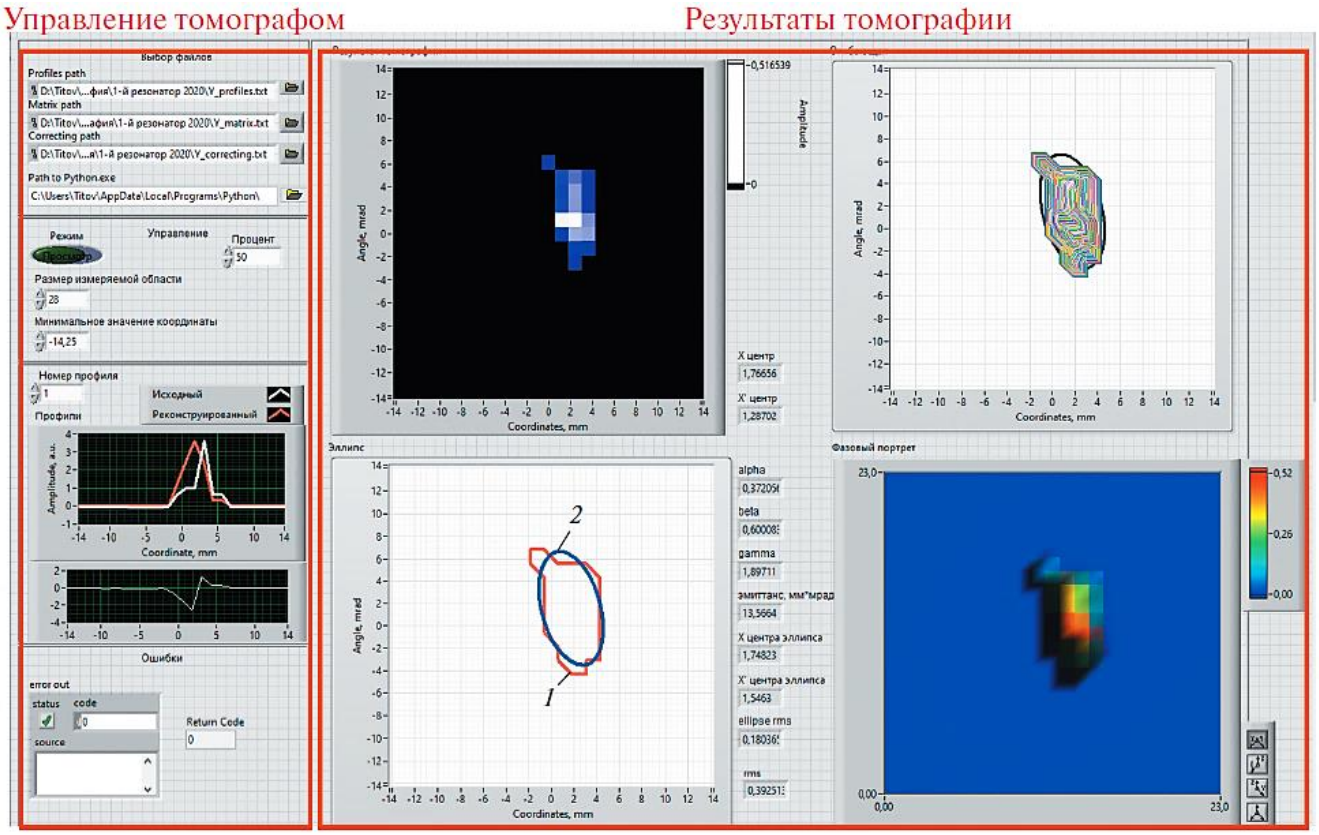


Рисунок 1.4.2 – Окно программы томографической реконструкции поперечного эмиттанса пучка на ЛУ ИЯИ РАН с отображением типичных результатов измерений.

Электростатический измеритель эмиттанса

Электростатический измеритель эмиттанса [88] (англоязычный термин: Alisson scanner) является устройством для измерений поперечного эмиттанса пучков. Он часто используется для измерений в низкоэнергетических каналах транспортировки и обладает следующими преимуществами:

- высокое пространственное разрешение благодаря использованию щелей малого размера и высокоточного приводов с шаговыми двигателями;
- высокое угловое разрешение благодаря малому шагу изменения смещающего напряжения.

Физические принципы работы и типичные характеристики

Принципиальная схема электростатического измерителя эмиттанса и пример реализации показаны на рисунке 1.4.3 [89].

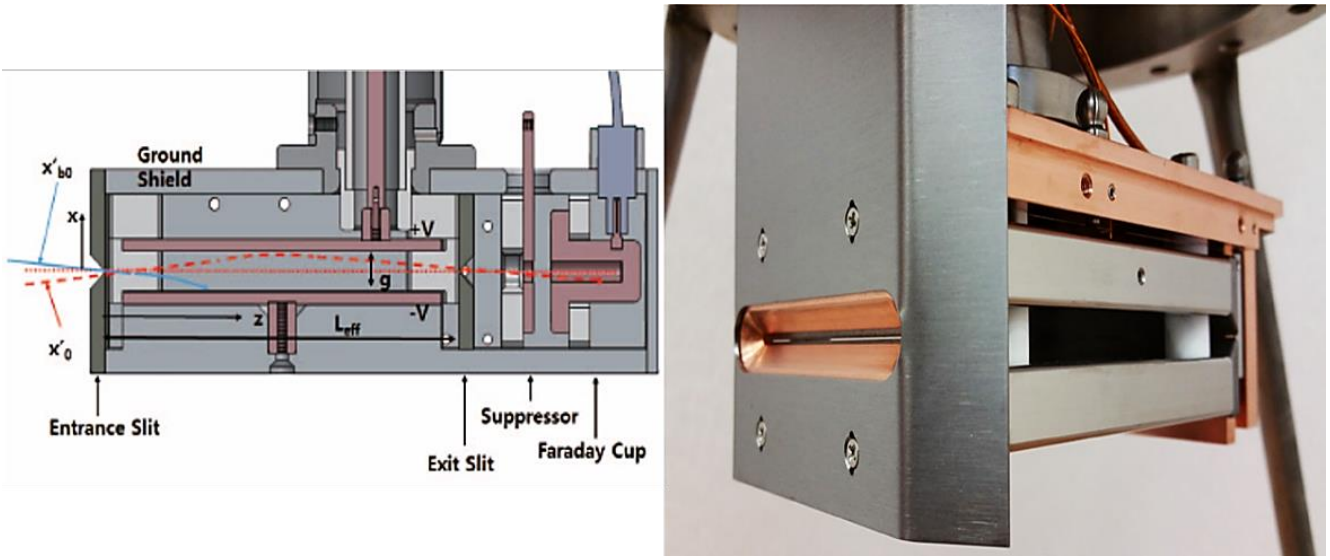


Рисунок 1.4.3 – Схема работы и фотография электростатического измерителя эмиттанса производства фирмы ITS (Южная Корея)

Пучок попадает на переднюю щель, выделяющую прохождение частиц по заданной координате, для которой будет производиться измерение расхождения. Путем изменения напряжения на электростатическом дефлекторе частицы, влетающие под определенным углом в переднюю щель, попадают в заднюю щель, за которой находится измеритель, чаще всего им является цилиндр Фарадея. Частицы, летящие под другими углами, могут попасть в измеритель только после изменения напряжения. Таким образом, проводится сканирование расхождения пучка для определенной координаты, после чего измеритель перемещается в ионопроводе для измерений в другой координате.

Для проведения измерений при помощи электростатического измерителя эмиттанса требуется провести сотни и даже тысячи отдельных измерений. Например, подобные измерения на ускорителе PIP-II требуют 3000 отдельных измерений и занимают 5 минут при частоте пучка 20 Гц [90].

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Конструкции электростатических измерителей эмиттанса в основном отличаются входными щелями и отклоняющими электродами. Для низкоинтенсивных пучков к входной щели не предъявляется особых требований, и она изготавливается без дополнительных систем охлаждения.

Для высокоинтенсивных пучков, напротив, необходимо использовать толстые входные щели с активной системой охлаждения. Так для электростатического измерителя ESS [91] используется отдельный тепловой экран (Рисунок 1.4.4), который устанавливается перед входной щелью. Его форма позволяет защитить все узлы измерителя от пучка, с номинальной запасенной энергией 600 Дж.

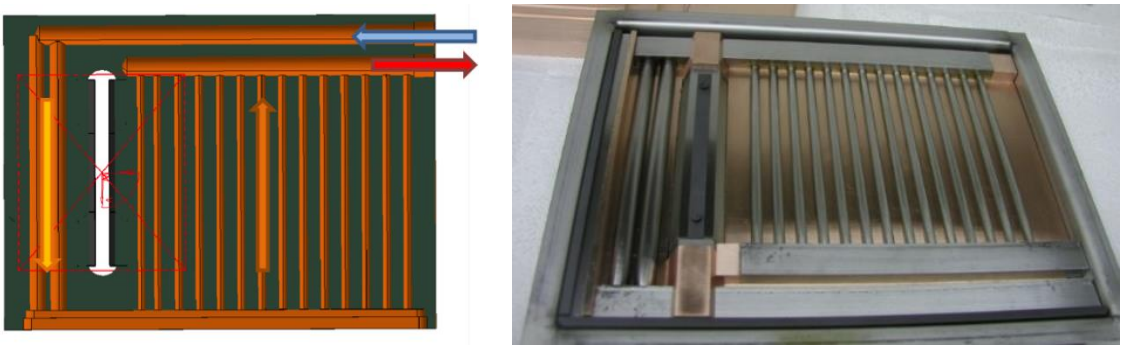


Рисунок 1.4.4 – Схема и фотография теплового экрана измерителя эмиттанса ESS

Отклоняющие электроды в основном делают плоскими для увеличения однородности поля, однако в некоторых случаях поверхность электрода изготавливается ступенчатой для минимизации рассеяния частиц пучка, попавших на электрод, обратно в пространство между электродами. Такой конструкцией обладает электростатический измеритель эмиттанса для SNS (Рисунок 1.4.5) [92].

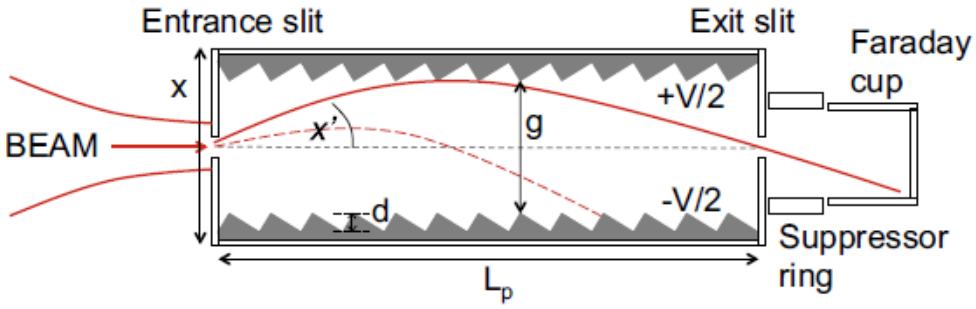


Рисунок 1.4.5 – Схема электростатического измерителя эмиттанса для SNS

Для электростатических измерителей эмиттанса существуют расчеты, оценивающие угловое разрешение и прохождение частиц в зависимости от конфигурации измерительной камеры [93]. В частности, на рисунке 1.4.6 показаны четыре типичные конфигурации измерителей. Во всех моделях зазоры в щелях s, электроды длины L, зазор между электродами g, потенциал на электродах $+V_0$ и $-V_0$, кинетическая энергия налетающих частиц E. В моделях с толстой щелью толщина щели d. В моделях с симметричным расположением электродов расстояние между щелью и электродом l, в несимметричных моделях расстояния l_1 и l_2.

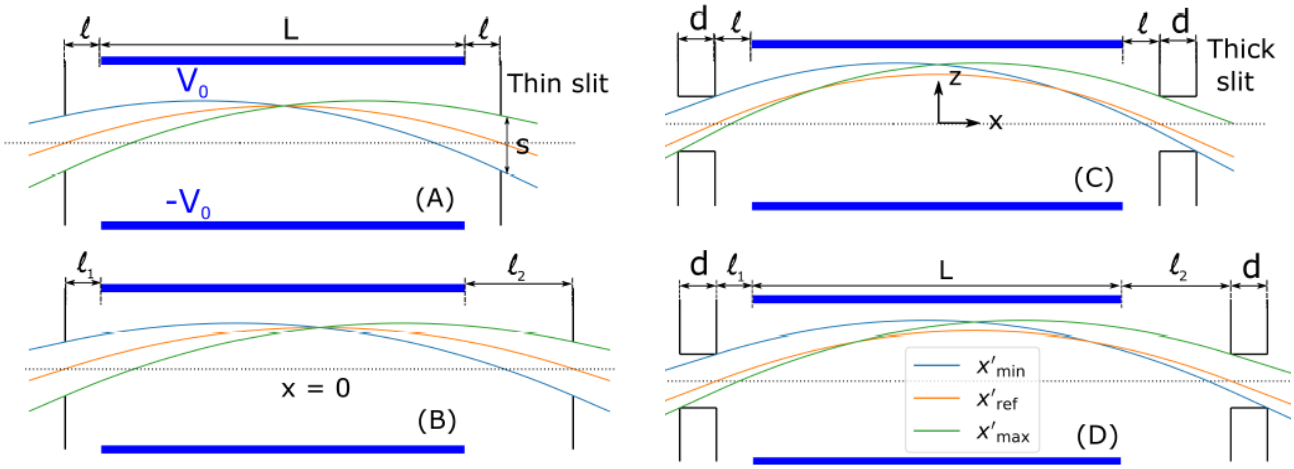


Рисунок 1.4.6 – Схема моделей электростатических измерителей: A – тонкие щели и симметричное расположение электродов; B – тонкие щели и несимметричное расположение электродов; C – толстые щели и симметричное расположение электродов; D – толстые щели и несимметричное расположение электродов

В работе были оценены следующие величины: $x'_{\text{эт}}$ – угол частицы, пересекающей щели в одной и той же координате, $x'_{\text{мин}}$ – минимальный угол, с которым частица может пройти обе щели, $x'_{\text{макс}}$ – максимальный угол, с которым частица может пройти обе щели, $\Delta x' = x'_{\text{макс}} - x'_{\text{мин}}$ – угловое разрешение, $p(x')$ = (количество прошедших обе щели частиц с углом x')/(количество упавших на первую щель частиц с углом x') – коэффициент прохождения для частиц с углом x', $T = \int_{x'_{\text{мин}}}^{x'_{\text{макс}}} p(x')dx'$ – коэффициент прохождения измерителя. Формулы для вычисления всех величин для четырех моделей представлены в таблице 1.4.1.

Таблица 1.4.1 – Формулы для вычисления углового разрешения и коэффициента прохождения для разных моделей электростатического измерителя эмиттанса

Модель	A	B	C	D
Расстояние до щели	Симметрично	Несимметрично	Симметрично	Несимметрично
Щель	Тонкая	Тонкая	Толстая	Толстая
$x'_{\text{эт}}$	$\frac{1}{2}\frac{qV_0L}{gE}$	$\frac{1}{2}\frac{qV_0L}{gE}\left(\frac{L+2l_2}{L+l_1+l_2}\right)$	$\frac{1}{2}\frac{qV_0L}{gE}$	$\frac{1}{2}\frac{qV_0L}{gE}\left(\frac{L+2l_2}{L+l_1+l_2}\right)$
$x'_{\text{макс}} - x'_{\text{эт}}$	$\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{L}+2\mathrm{l}}$	$\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{L}+\mathrm{l}_1+\mathrm{l}_2}$	$\frac{\mathrm{s}-\mathrm{x}'_{\text{эт}}d}{\mathrm{L}+2\mathrm{l}+\mathrm{d}}$	$\frac{\mathrm{s}-\mathrm{x}'_{\text{эт}}d}{\mathrm{L}+\mathrm{l}_1+\mathrm{l}_2+d}$
$x'_{\text{эт}} - x'_{\text{мин}}$	$\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{L}+2\mathrm{l}}$	$\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{L}+\mathrm{l}_1+\mathrm{l}_2}$	$\frac{\mathrm{s}-\mathrm{x}'_{\text{эт}}d}{\mathrm{L}+2\mathrm{l}+\mathrm{d}}$	$\frac{s}{\mathrm{L}+\mathrm{l}_1+\mathrm{l}_2+d}\left(1-\frac{L+2l_1}{L+2l_2}\frac{\mathrm{x}'_{\text{эт}}d}{s}\right)$
$\Delta x'$	$\frac{2s}{\mathrm{L}+2\mathrm{l}}$	$\frac{2s}{\mathrm{L}+\mathrm{l}_1+\mathrm{l}_2}$	$\frac{2s}{\mathrm{L}+\mathrm{l}}\left(1-\frac{\mathrm{x}'_{\text{эт}}d}{s}\right)$	$\frac{2s}{\mathrm{L}+\mathrm{l}_1+\mathrm{l}_2+d}\left(1-\frac{L+l_1+l_2}{L+2l_2}\frac{\mathrm{x}'_{\text{эт}}d}{s}\right)$
$p(x')$, $x' \geq x'_{\text{эт}}$	$\frac{x'-x'_{\text{эт}}}{x'_{\text{макс}}-x'_{\text{эт}}}$		$\frac{x'-x'_{\text{эт}}}{x'_{\text{макс}}-x'_{\text{эт}}}\left(1-\frac{x'_{\text{эт}}d}{s}\right)$	
$p(x')$, $x' < x'_{\text{эт}}$	$\frac{x'_{\text{эт}}-x'}{x'_{\text{эт}}-x'_{\text{мин}}}$		$\frac{x'_{\text{эт}}-x'}{x'_{\text{эт}}-x'_{\text{мин}}}\left(1-\frac{x'_{\text{эт}}d}{s}\right)$	
T	$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{2}\left(1-\frac{x'_{\text{эт}}d}{s}\right)$	

Диафрагмированный измеритель эмиттанса

Диафрагмированный измеритель эмиттанса (англоязычный термин: pepper-pot), является распространенным устройством для измерений поперечного эмиттанса пучков низких энергий и обладает двумя важными преимуществами:

- измерение всех требуемых параметров проводится за один импульс тока пучка,
- измерения проводятся одновременно в двух фазовых плоскостях.

Физические принципы работы и типичные характеристики

Работа диафрагмированных измерителей эмиттанса основана на следующем принципе: из пучка выделяется квазиточечная часть частиц, которая проходит некоторый участок дрейфа, после чего попадает на позиционно-чувствительный измеритель профиля. За время дрейфа частицы, летящие под разными углами к оси

пучка, расходятся в пространстве, поэтому, измеряя профиль распределения частиц после дрейфа (Рисунок 1.4.7), можно определить угловое расхождение пучка для заданной координаты.

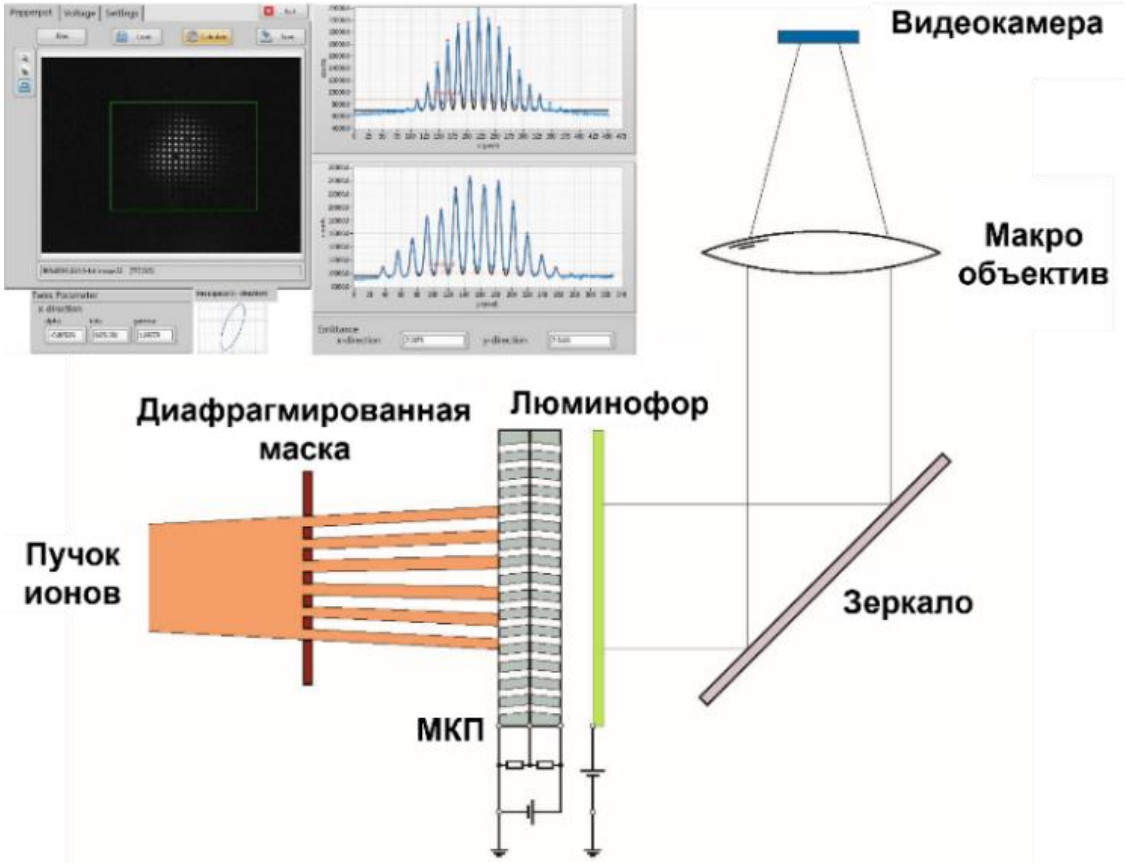


Рисунок 1.4.7 – Схема измерения поперечного эмиттанса пука с использованием диафрагмированного измерителя и пример обработки регистрируемых данных

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Общая схема диафрагмированного измерителя остается одинаковой для различных практических реализаций. В качестве маски выступает металлическая пластина с точечными отверстиями. Пучок, не попавший в отверстия, полностью поглощается пластиной. Для проведения измерений измерительная часть прибора вводится в ионопровод при помощи привода (Рисунок 1.4.8) [94]. Чаще всего в качестве измерителей профиля выступают ЭОП на основе МКП или люминесцентный экран, изображение с которых регистрируется при помощи видеокамеры.

Измеритель профиля устанавливается параллельно диафрагмированной маске, а изображение передается с помощью зеркала, установленного под углом 45°, на видеокамеру, закрепленную снаружи вакуумной камеры.

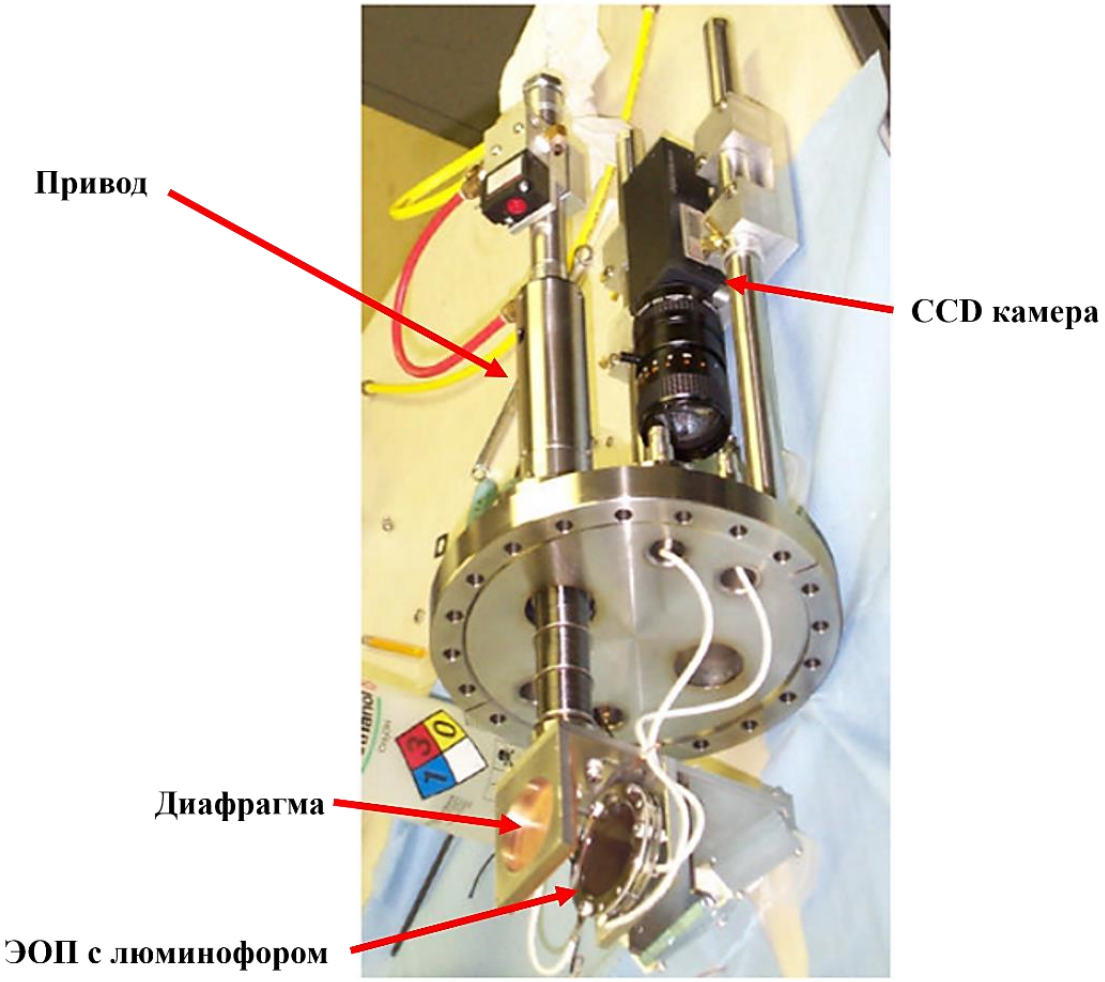


Рисунок 1.4.8 – Измеритель с ЭОП и зеркалом под углом 45° для ускорителя BNL

Также возможна схема с наклоненным под 45° измерителем профиля, что позволяет не использовать зеркало, однако такая схема почти не используется, поскольку приводит к изменению величины дрейфа для разных частей пучка, что усложняет анализ результатов.

Одной из проблем при использовании люминесцентных экранов является деградация люминофора под воздействием пучка (Рисунок 1.4.9) [95]. Со временем световыход деградирующих областей падает, что приводит к искажению измерений и необходимости производить замену экрана.

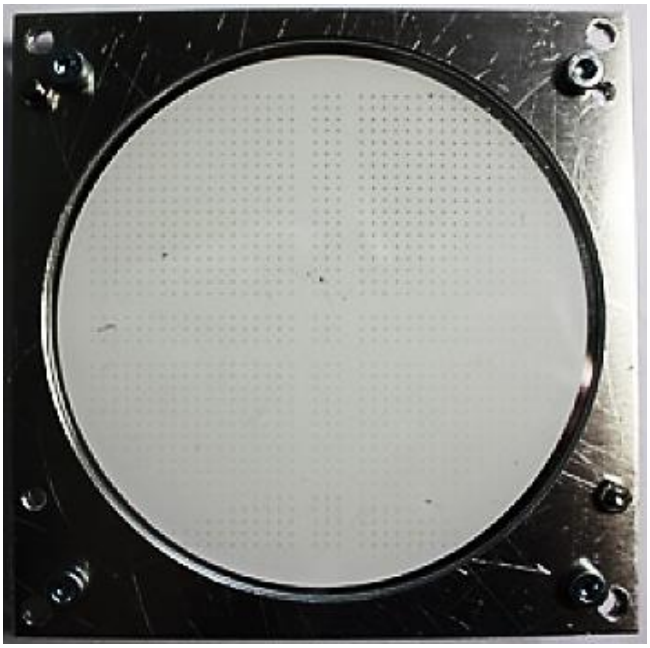


Рисунок 1.4.9 – Люминесцентный экран диафрагмированного измерителя эмиттанса для LINAC4 после непрерывных измерений в течение нескольких часов

Основные различия между измерителями касаются диафрагмированной маски, итоговая конфигурация которой определяется параметрами измеряемого пучка и требованиями к разрешающей способности. При измерении низкоинтенсивных пучков конструкция диафрагмы упрощается, так как нет существенных тепловых нагрузок, при измерении высокоинтенсивных пучков необходимо использовать активное охлаждение. Однако на практике диафрагмированные измерители эмиттанса редко используют для сильноточных пучков, отдавая предпочтение щелевым измерителям, поскольку в этих случаях проще организовать эффективную систему охлаждения.

Для повышения разрешающей способности прибора необходимо уменьшать диаметр отверстий в маске. Однако с уменьшением диаметра отверстия растет технологическая сложность его изготовления, и возрастает количество неточностей при изготовлении всего массива отверстий. На рисунке 1.4.10 представлено изображение реальных отверстий, изготовленных при помощи лазерной резки и химической литографии [96]. Помимо неравномерной формы отверстий на разрешение прибора также влияет шаг между отверстиями и углы, под которыми они выполнены.

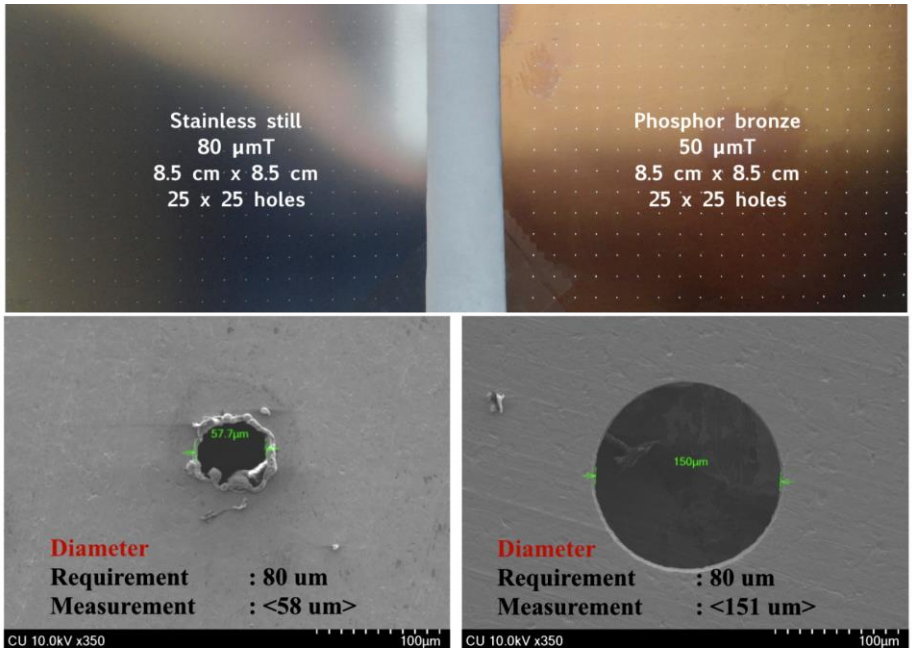


Рисунок 1.4.10 – Примеры масок, изготовленных лазерной резкой (слева) и химической литографией (справа) для одинакового заданного диаметра отверстий

Также диафрагмированный измеритель обладает существенным недостатком – его пространственное разрешение определяется расстоянием между отверстиями и на практике не превышает 1 мм. С одной стороны, чем ближе отверстия, тем лучше пространственное разрешение. С другой стороны, при сближении отверстий уменьшается диапазон измеряемых углов и угловое разрешение. Итоговые значения разрешения и рабочего диапазона определяются соблюдением баланса между требованиями к точности измерений.

Очевидно, что расстояние между отверстиями в маске s не должно превышать требуемой величины пространственного разрешения. Для определения параметров устройства на основе требований к угловому разрешению можно воспользоваться рассуждениями и расчетными формулами, которые представлены ниже. Изображение каждого отверстия в маске должно достоверно обрабатываться при помощи видеокамеры. Для маски с отверстиями диаметром d можно считать, что на 1 мм регистрируемого изображения приходится n пикселей матрицы видеокамеры. Для оценки можно принять, что для достоверной обработки профиля изображения необходимо не менее 20 точек, следовательно, полный размер

(при нормальном распределении частиц по углу) изображения отверстия должен быть не менее 20/n мм. Для того чтобы угловое разрешение α_{min} соответствовало требованиям, расстояние между маской и ЭОП должно быть равно:

$$L = \frac{20/n[\text{мм}] - d}{6\alpha_{min}}. \quad (1.4.4)$$

Максимальная величина среднеквадратичного углового расхождения, которая может быть точно измерена, $\alpha_{3\sigma}$ (максимальный угол, при котором профили пучка от соседних отверстий не начинают пересекаться) можно оценить по следующей формуле

$$\alpha_{3\sigma} = \frac{s - d}{6L}. \quad (1.4.5)$$

Оценку для максимально измеряемого угла можно сделать при предположении, что профили пучка от двух соседних отверстий пересекаются на полувысоте. Если данное условие выполнено, то оценка сверху среднеквадратичного углового расхождения α_{FWHM} определяется как

$$\alpha_{FWHM} = \frac{s}{4\sqrt{2\ln 2}\,L}. \quad (1.4.6)$$

Поскольку пластина имеет конечную толщину t, то максимальный среднеквадратичный угол $\alpha_{\text{маски}}$, который может иметь частица, проходящая через отверстие, определяется по формуле

$$\alpha_{\text{маски}} = \frac{d}{2t}. \quad (1.4.7)$$

Поскольку маска изготавливается с некоторыми неточностями, то на пространственное разрешение влияет точность расположения отверстий в маске и точность установки самой диафрагмированной маски. Точность определения положения складывается из точности изготовления отверстий и точности установки маски. На точность измерения угла влияет больше параметров, чем на измерение координаты, а именно допуски на диаметр отверстия, точность установки маски и ЭОП, а также допуски на перпендикулярность отверстия.

Щелевой измеритель эмиттанса

Щелевой измеритель эмиттанса (англоязычный термин: slit-grid), является наиболее популярным устройством для измерения поперечного эмиттанса пучка на линейных ускорителях ионов и считается эталоном при проведении данного типа диагностики. К его несомненным преимуществам можно отнести:

- высокое пространственное разрешение благодаря использованию щелей малого размера и высокоточных приводов с шаговыми двигателями;
- высокое угловое разрешение благодаря большому пространству дрейфа, которое при этом можно использовать для установки другого оборудования;
- возможность использования стандартного многопроволочного профилометра для регистрации профиля пучка, вырезанного щелью.

Физические принципы работы и типичные характеристики

Щелевой измеритель эмиттанса работает на тех же физических эффектах, что и диафрагмированный измеритель. Отличие состоит в том, что в щелевом измерителе используется одна щель для выделения части пучка, которая перемещается при помощи вакуумного ввода движения в ионопроводе (Рисунок 1.4.11). Профилометр перемещается вместе с щелью для измерения углового распределения в вырезанном пучке. Щелевой измеритель эмиттанса позволяет проводить измерения только в одной плоскости. Пространственное разрешение данного прибора определяется размером щели и на практике может составляет ~100 мкм. Щелевой измеритель эмиттанса проводит сканирование пучка, как и электростатический сканер, однако, благодаря профилометру, для измерения углового распределения пучка в заданной координате требуется одно измерение, что делает щелевой измеритель на порядок быстрее электростатического.

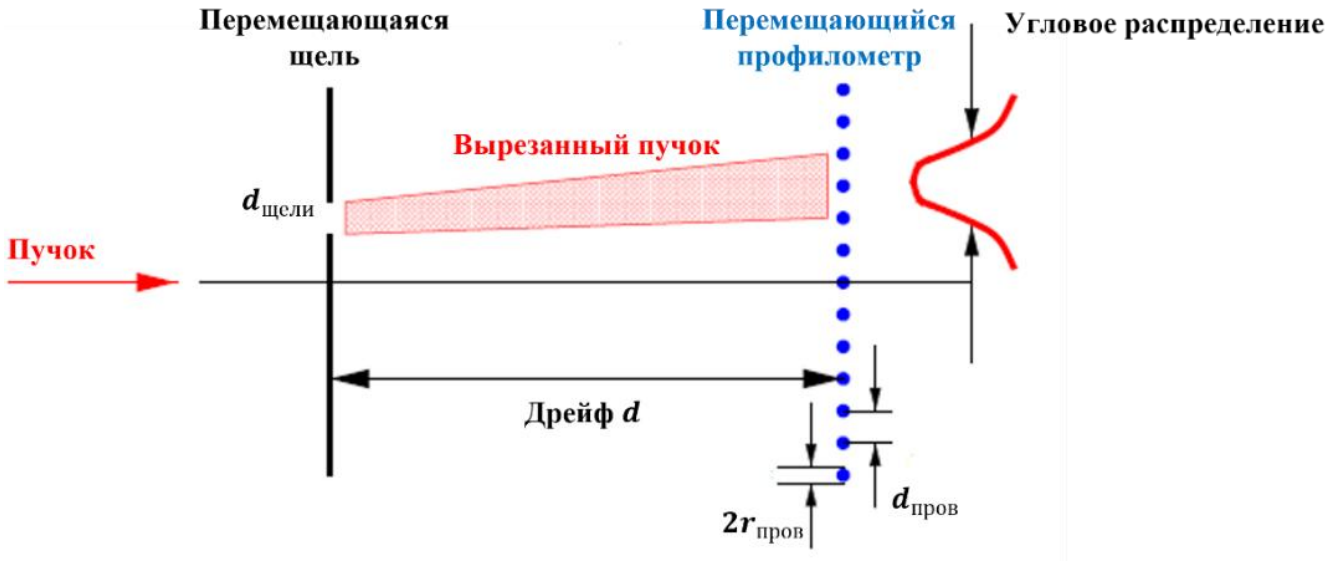


Рисунок 1.4.11 – Схема измерений при помощи щелевого измерителя эмиттанса

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Практическая реализация щелевых измерителей эмиттанса требует решения нескольких технологических вопросов. Одним из них является компоновка устройства (Рисунок 1.4.12).

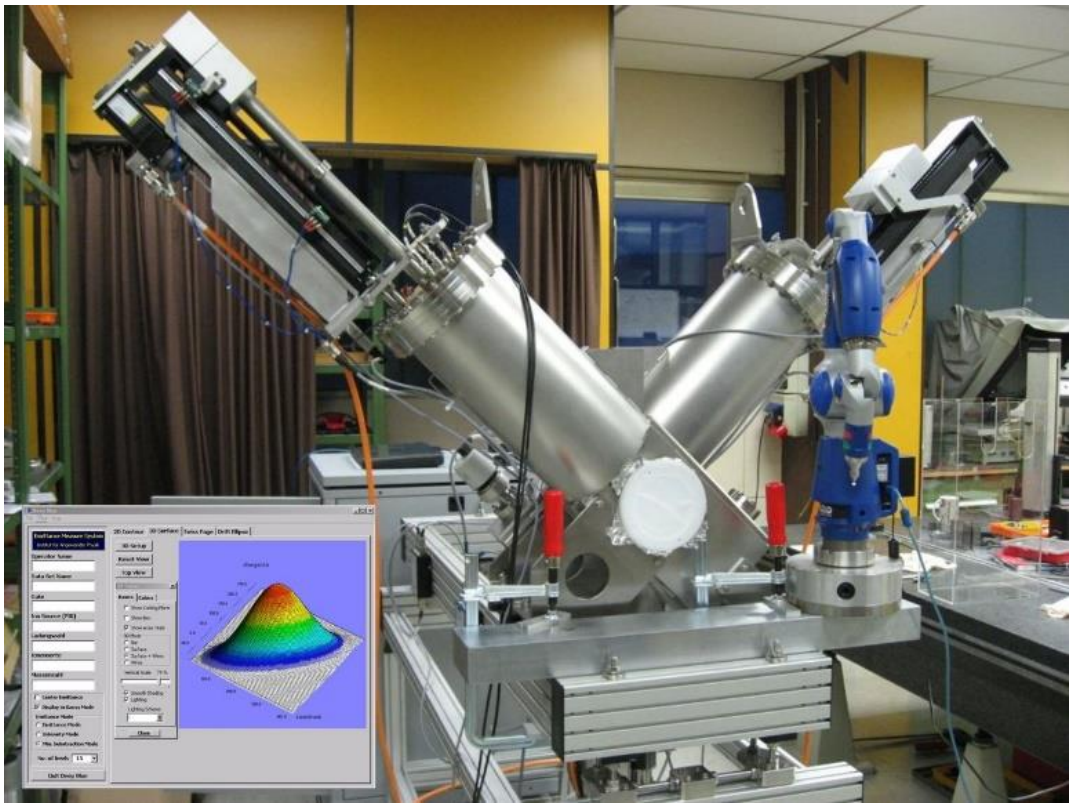


Рисунок 1.4.12 – Пример компоновки щелевого измерителя эмиттанса фирмы NTG

Поскольку одна пара “щель + профилометр” проводит измерения для одной плоскости, то для проведения полных измерений необходимо две таких пары. Конструктивные особенности системы ввода щелей и профилометров совпадают с особенностями проволочных сканеров, поскольку щелевой измеритель эмиттанса также проводит сканирование пучка. На практике в качестве измерителя профиля в основном используется многопроволочный профилометр типа «арфа» со всеми конструктивными особенностями характерными для данного устройства.

Еще одной проблемой, возникающей при разработке щелевого измерителя, является геометрия самой щели. Максимальный среднеквадратичный угол, под которым частица может пройти через щель, определяется по формуле (1.4.7). Геометрия щели существенным образом зависит от параметров пучка (Рисунок 1.4.13).

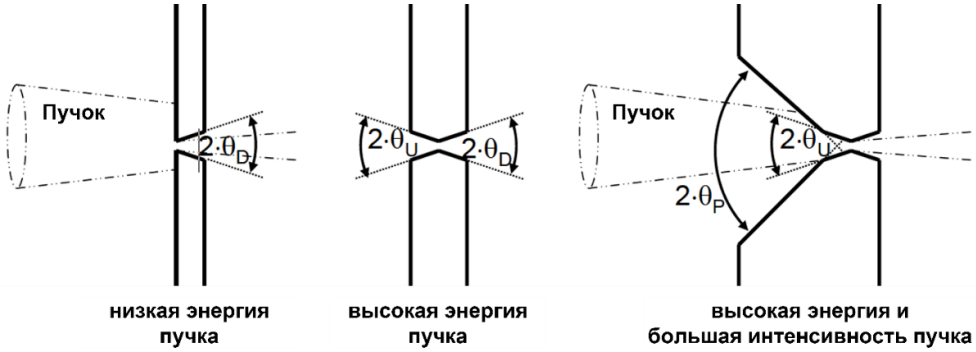


Рисунок 1.4.13 – Рекомендуемая геометрия щелей для разных параметров пучка

В случае низкоэнергетических низкоинтенсивных ионных пучков геометрия значительно упрощается и не требует дополнительных механизмов активного охлаждения, позволяя сократить размеры всей конструкции (Рисунок 1.4.14) [97].

В случае высокоинтенсивных пучков щель делают со сходящимися гранями, чтобы минимизировать итоговую толщину пластины в месте, где вырезается часть пучка с заданной координатой, и обеспечить максимальный угловой размер (Рисунок 1.4.15) [98].

На толщину пластины также влияют тепловые нагрузки от взаимодействия с пучком. При измерении высокоинтенсивных пучков для щелей требуется активное охлаждение (Рисунок 1.4.16) [59], например, перед щелями ставят дополнительные тепловые экраны из тугоплавких материалов с каналами водяного охлаждения.

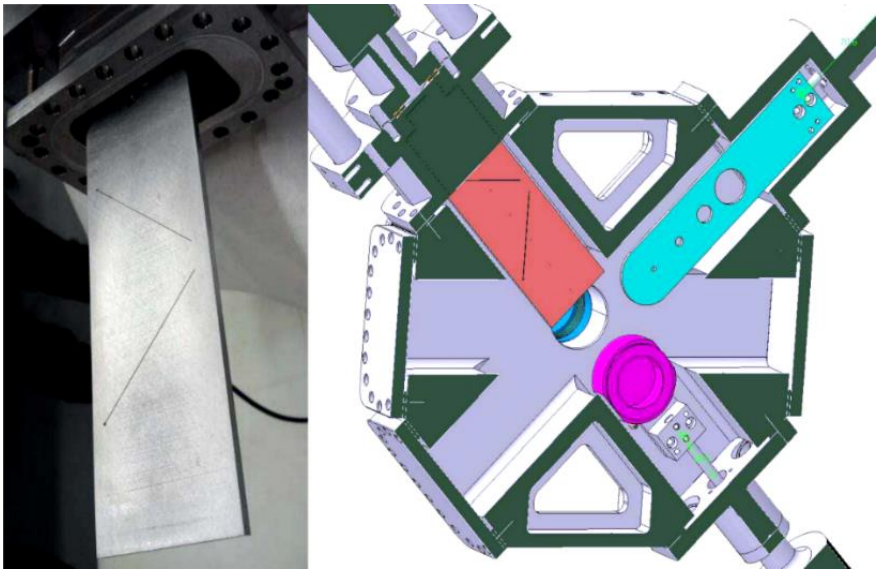


Рисунок 1.4.14 – Фотография и схема размещения на одной алюминиевой пластине двух взаимно перпендикулярных щелей для HIE-ISOLDE CERN

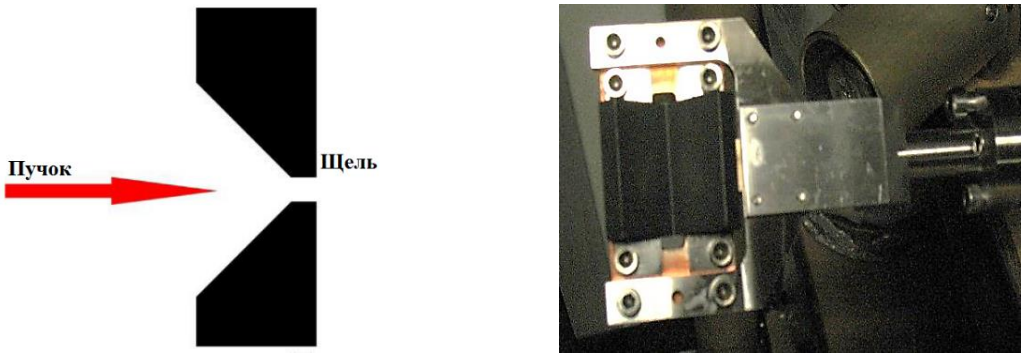


Рисунок 1.4.15 – Схема и фотография щели измерителя эмиттанса для SNS

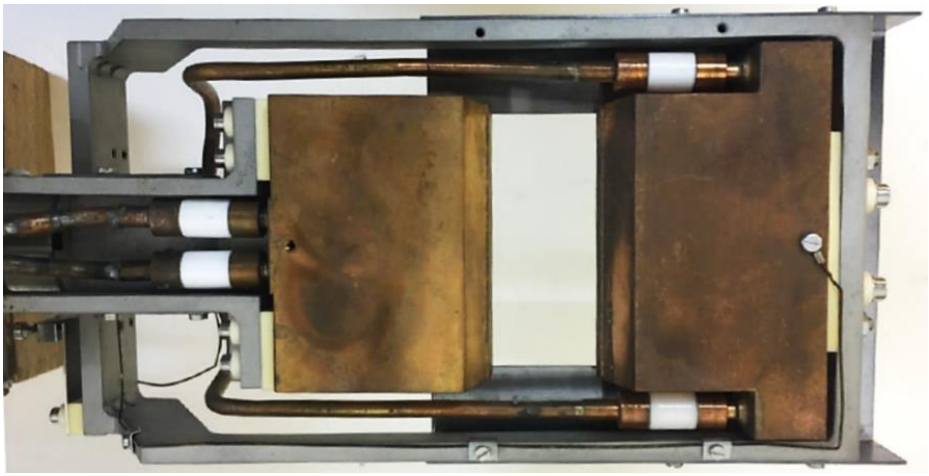


Рисунок 1.4.16 – Фотография щели измерителя эмиттанса для iThemba LABS с активным охлаждением

Для щелевого измерителя также можно провести оценки пространственного и углового разрешений и их связь с параметрами измерителя. Пространственное разрешение определяется шириной щели. Угловое разрешение α, зависящее от длины промежутка дрейфа L, радиуса проволочки $r_{\text{пров}}$ и расстояния между проволочками $d_{\text{пров}}$, равно:

$$\alpha = \frac{d_{\text{пров}} + 2r_{\text{пров}}}{L}. \tag{1.4.8}$$

Рабочий диапазон измерителя определяется максимальным среднеквадратичным угловым расхождением α_{max}, которое может быть точно измерено детектором. Для оценок следует принять, что угловое расхождение можно точно измерить, если получившийся после щели профиль не превышает рабочую апертуру профилометра h. Тогда угловое расхождение находится по формуле

$$\alpha_{max} = \frac{h}{6L}. \tag{1.4.9}$$

В случае, если среднеквадратичные размеры пучка будут превышать максимально измеримые, можно уменьшить промежуток дрейфа. Минимальная величина промежутка дрейфа L_{min} оценивается по следующей формуле

$$L_{min} = \frac{d_{\text{пров}} + 2r_{\text{пров}}}{\alpha_{min}}, \tag{1.4.10}$$

где α_{min} – минимальное угловое разрешение.

1.5 Положение и фаза пучка

Одним из ключевых параметров пучка в ускорителе и каналах транспортировки является положение его центра тяжести. В частности, для его определения можно воспользоваться результатами обработки данных профилометров – зная распределение плотности тока в поперечном сечении пучка, нетрудно определить координату его центра тяжести, однако, как правило, количество точек, в которых необходимо измерять положение пучка существенно больше количества точек, в которых требуется измерение его профиля, в связи с этим использование профилометров в качестве датчиков положения представляется на практике нецелесообразным из-за их относительно высокой стоимости, а основная роль приходится на более простые в устройстве и эксплуатации измерители, изначально предназначенные для данной конкретной диагностической задачи:

- Вторично-эмиссионные и пьезоакустические контактные датчики положения пучка, подходящие для использования на входах в мишенные узлы, ловушки или перед выходным окном ионопровода ускорителя, где можно пренебречь возмущающим влиянием датчика на дальнейшую динамику детектируемого пучка.
- Резистивные датчики стеночного тока – редко используемые в качестве датчиков положения широкополосные (10 кГц ÷ 10 ГГц) преобразователи, предназначенные в основном для контроля продольной формы сгустков. Принцип действия этих датчиков основан на том, что проводящая стенка ионопровода разделена керамической вставкой, и ток изображения пучка протекает через перемычку из 10 ÷ 100 низкоомных резисторов, падение напряжения на которых является источником сигнала.
- Магнитоиндукционные преобразователи, которые могут работать на основе вакуумных магниточувствительных диодов или принципов работы индукционного или стеночного датчика тока, когда разность сигналов с двух

обмоток или токовых перемычек, соответственно, характеризует величину смещения центра тяжести пучка и его знак.

- Резонаторные датчики гармоники тока, обладающие высокой чувствительностью и позволяющие измерять не только положение, но и фазу, ток, а также микроструктуру пучка. Разрешение таких детекторов может достигать 1 мкм для одиночных импульсов длительностью 1 мкс, однако процесс настройки резонатора и фильтрации паразитных гармоник представляет собой сложную итеративную технологическую задачу.
- Ёмкостные и полосковые датчики, которые являются наиболее проработанными датчиками положения и фазы пучка как по конструкции, так и с точки зрения предусилительной и обрабатывающей электроники.

Пик-ап электроды

Чаще всего в современных резонансных ускорителях ионов поперечное положение центра тяжести пучка, а также его фазовое положение относительно ускоряющей гармоники ВЧ-поля определяют с помощью датчиков (Рисунок 1.5.1), принцип действия которых заключается в измерении тока изображения, индуцированного электрическим полем пучка в изолированной металлической пластине – пик-ап электроде (англоязычный термин: PU – Pick-Up).

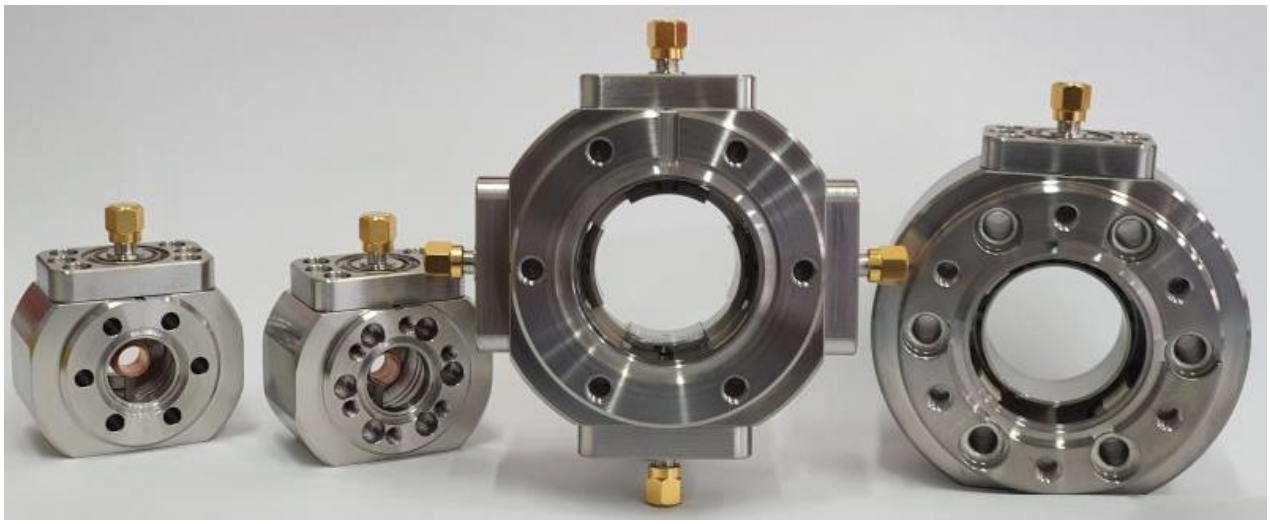


Рисунок 1.5.1 – Ёмкостные пик-ап электроды, производства фирмы NTG

Для измерений положения пучка используются четыре пластины, суммы и разности сигналов с которых позволяют определить положение центра тяжести. Такие устройства традиционно называют датчиками положения пучка (ДПП, англоязычный термин: BPM – beam position monitor) и располагают возле каждой квадрупольной линзы (Рисунок 1.5.2). Поскольку электрическое поле сгруппированного пучка зависит от времени, на пластине возникает сигнал от переменного тока, сбор которого осуществляется с помощью ВЧ-методик и технологий.

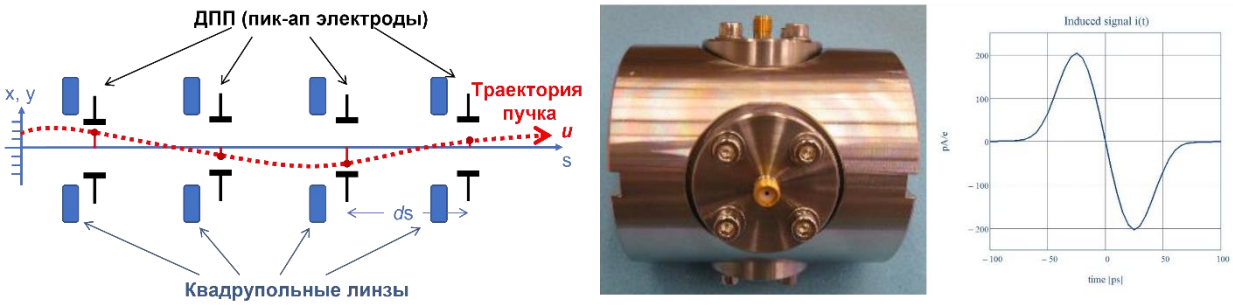


Рисунок 1.5.2 – Типичная схема расположения, фотография и характерный сигнал ДПП

Фазовые измерения необходимы для проведения процедуры продольного согласования ускоряющих секций. Благодаря дифференциальной форме сигнала от тока пучка (Рисунок 1.5.3) [99] центр сгустка и его положение относительно синхронной фазы ускоряющей гармоники могут быть определены с высокой точностью.

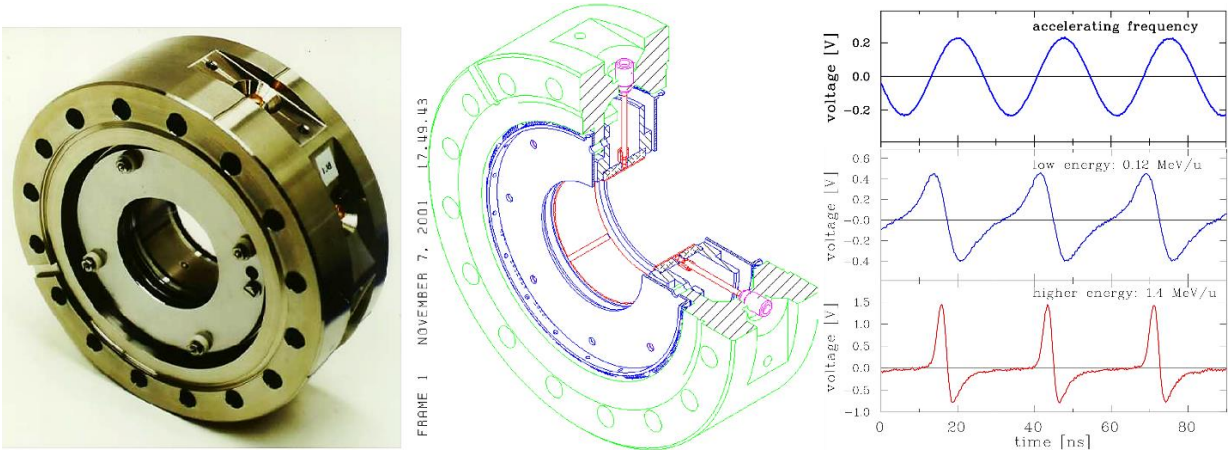


Рисунок 1.5.3 – Датчик положения пучка UNILAC GSI (Германия) с апертурой 50 мм. На графике изображены сигналы от сгустков пучка с энергией 0.12 МэВ/нуклон и 1.4 МэВ/нуклон с привязкой к ВЧ-гармонике 36 МГц

В качестве датчиков фазы пучка (англоязычный термин: BPP – beam phase probe) часто используются более простые одноэлектродные конструкции, при этом пары таких датчиков можно использовать для времяпролетных измерений (англоязычный термин: ToF – time of flight) средней энергии пучка (Рисунок 1.5.4).

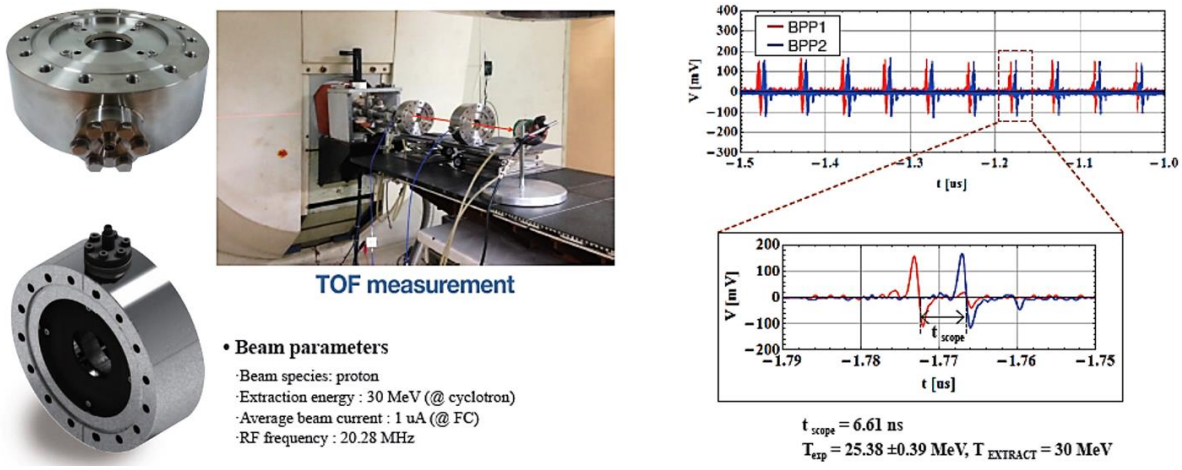


Рисунок 1.5.4 – Датчики фазы пучка фирмы ITS (Южная Корея) и пример результата времяпролетных измерений энергии пучка с их помощью.

Физические принципы работы и типичные характеристики

Принцип работы ёмкостного пик-ап электрода поясняется на рисунке 1.5.5 [99]. В простейшей конфигурации пик-ап электрод состоит из размещенного в ионопроводе изолированного плоского или кольцевого электрода, на который наводится заряд от проходящего рядом пучка частиц.

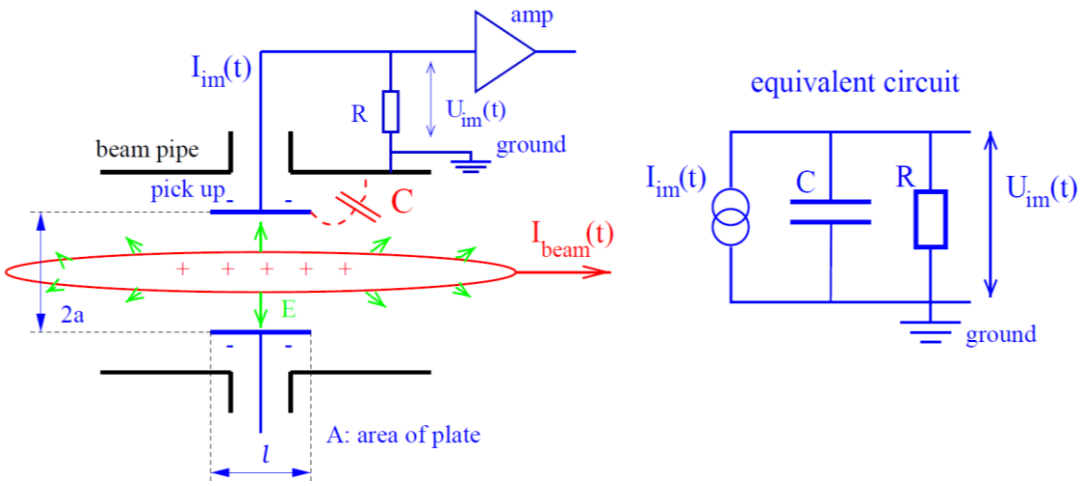


Рисунок 1.5.5 – Схема работы пик-ап электрода и его эквивалентная электрическая схема

Ток изображения, возникающий при прохождении импульса тока пучка равен:

$$I_{im}(t) \equiv \frac{dQ_{im}}{dt} = -\frac{A}{2\pi a l} \cdot \frac{dQ_{beam}(t)}{dt}, \tag{1.5.1}$$

где A – площадь электрода, l – длина электрода вдоль пучка, a – расстояние от электрода до центра тяжести пучка, при этом падение напряжения на входном сопротивлении предусилителя оказывается зависящим как от геометрических параметров, так и от скорости βc и частоты следования $\omega = 2\pi f$ сгустков:

$$U_{im} = Z_t(\omega, \beta) \cdot I_{beam}(\omega) \equiv \frac{1}{\beta c} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{A}{2\pi a} \cdot \frac{i\omega RC}{1 + i\omega RC} \cdot I_{beam}(\omega). \tag{1.5.2}$$

В случае если $\omega \ll 1/RC$, зависимость 6.2 трансформируется в:

$$U_{im} = \frac{R}{\beta c} \cdot \frac{A}{2\pi a} \cdot i\omega I_{beam} = \frac{R}{\beta c} \cdot \frac{A}{2\pi a} \cdot \frac{dI_{beam}}{dt}, \tag{1.5.3}$$

т. е. измеряемое напряжение пропорционально производной тока пучка по времени и площади электрода, но не зависит от длины электрода вдоль пучка.

Именно этот предельный случай используют в ионных линаках, согласовывая импеданс на 50 Ом для предотвращения отражений и получения гладкого биполярного сигнала в достаточно широкой полосе пропускания до нескольких ГГц, с учетом того, что рабочие ВЧ-частоты современных ионных линаков лежат в диапазоне f_{RF}~ 80÷700 МГц.

Измеренные таким образом значения напряжений, наведенных на четырех электродах, используются для восстановления в линейном приближении положения пучка по следующим нормализованным соотношениям, не зависящим от амплитуды тока пучка:

$$X = \frac{1}{S_X} \cdot \frac{U_{\text{прав}} - U_{\text{лев}}}{U_{\text{прав}} + U_{\text{лев}}} + \delta_X, \qquad Y = \frac{1}{S_Y} \cdot \frac{U_{\text{верх}} - U_{\text{низ}}}{U_{\text{верх}} + U_{\text{низ}}} + \delta_Y, \tag{1.5.4}$$

где S [%/мм] – чувствительность ДПП, δ [мм] – смещение электрического центра ДПП относительно геометрического.

Основными характеристиками ДПП являются:

1. Чувствительность $S_X = \frac{d}{dX}\left(\frac{\Delta U_X}{\sum U_X}\right)\left[\frac{\%}{\text{мм}}\right]$ определяет процентное изменение напряжения на электроде пропорционально смещению пучка и в идеальном случае является константой, однако для больших смещений начинает нелинейно зависеть от величины смещения. Более того, чувствительность может зависеть от частоты следования сгустков, т. е. в общем случае является величиной $S\ (x, y, \omega)$.
2. Точность связана с правильностью определения положения пучка относительно каких-то базовых точек или известных фиксированных осей, например, осей симметрии квадрупольной линзы или выходного окна ионопровода. Основной вклад в значение точности вносят механические допуски, с которыми изготовлен ДПП, а также точность и стабильность его установки на ионопроводе, однако характеристики предусилительной электроники: температурный дрейф рабочей точки, электромагнитные наводки и пр. – также вносят свои погрешности.
3. Разрешение показывает возможность измерять малые относительные отклонения пучка и в большинстве случаев оказывается существенно лучше точности, особенно в случае процедуры усреднения во времени по большому количеству сгустков, достигая величин ~1 мкм.
4. Полоса пропускания, которая имеет несколько составляющих. «Аналоговая» часть, зависящая от качества согласования рабочих частот предусилительной электроники с частотным спектром измеряемого сгруппированного пучка, и «цифровая» часть, определяемая итоговым диапазоном измерений: широкополосный случай для быстрых измерений с низким разрешением и узкополосный случай для измерений с высоким разрешением при медленно изменяющихся параметрах пучка.

На основе принципов работы пик-ап электрода разработано несколько типов датчиков положения пучка: «пуговичный» (англоязычный термин: button BPM), «линейно-разрезной» или просто «разрезной» (англоязычный термин: linear-cut BPM) и «полосковый» (англоязычный термин: stripline BPM).

Пуговичный датчик положения пучка (Рисунок 1.5.6) [100] отличается наибольшей компактностью среди остальных датчиков этого типа, однако обладает значительной нелинейностью измерений, начинающейся со смещений ~1/8 апертуры. Для повышения точности измерений требуется численная коррекция обработанных результатов на основе предварительно рассчитанных функций, как правило, в виде полиномов, при этом также необходимо учитывать связь между координатами, например, в виде поправочных коэффициентов $C_{nm}x^ny^m$, где параметр C_{nm} составляется из сигналов по обеим координатам.

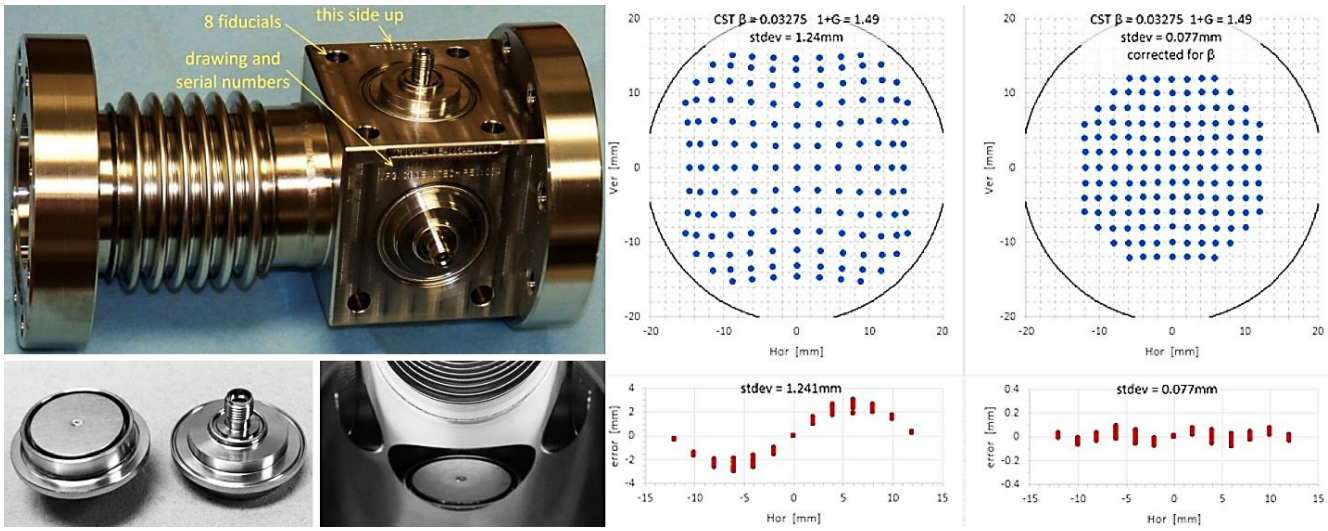


Рисунок 1.5.6 – Пуговичный ДПП для FRIB MSU и расчетные координаты положения пучка в линейном приближении и с полиномиальной коррекцией

В случае характерных для ионных линаков пучков с нерелятивистскими скоростями протяженное электрическое поле сгустка создает более длинный импульс измеряемого сигнала, чем фактическое распределение частиц в сгустке, что при сохранении апертуры ДПП приводит к меньшей частотной модуляции

сигнала и, как следствие, к уменьшению высокочастотных гармоник, дающих основной вклад в чувствительность в центральной квази-линейной области измерений (Рисунок 1.5.7) [99], причем зависимость S(ω) оказывается тем сильнее, чем больше частота рабочей гармоники.

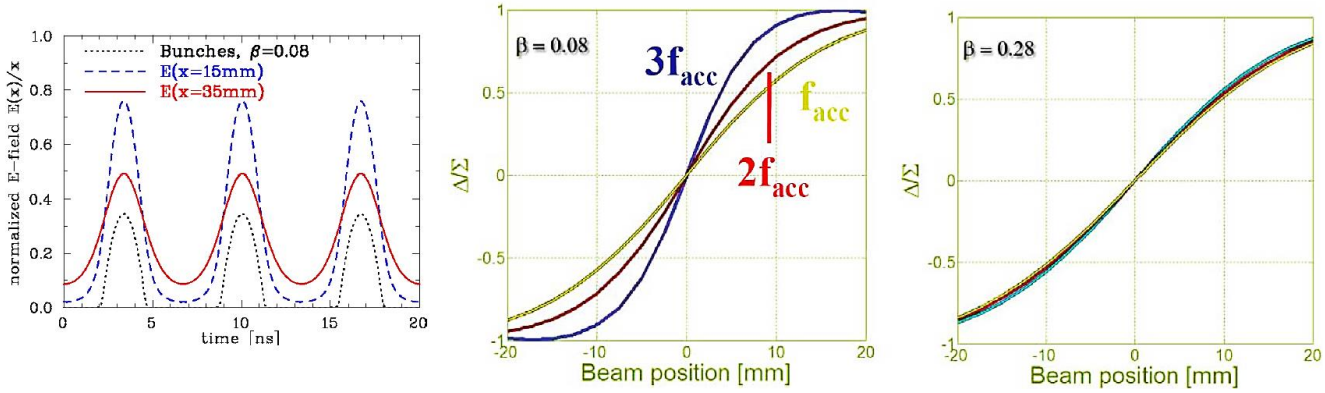


Рисунок 1.5.7 – Пример распределения электрического поля и результаты восстановления положения пучка с разными β для пуговичного ДПП

Линейный разрезной ДПП, как в прямоугольной конфигурации (Рисунок 1.5.8), так и в цилиндрической, чаще всего используется в протонных синхротронах благодаря высокой линейности измерений практически во всей апертуре и большому уровню сигнала, которые наблюдаются при рабочих частотах не выше нескольких десятков МГц.

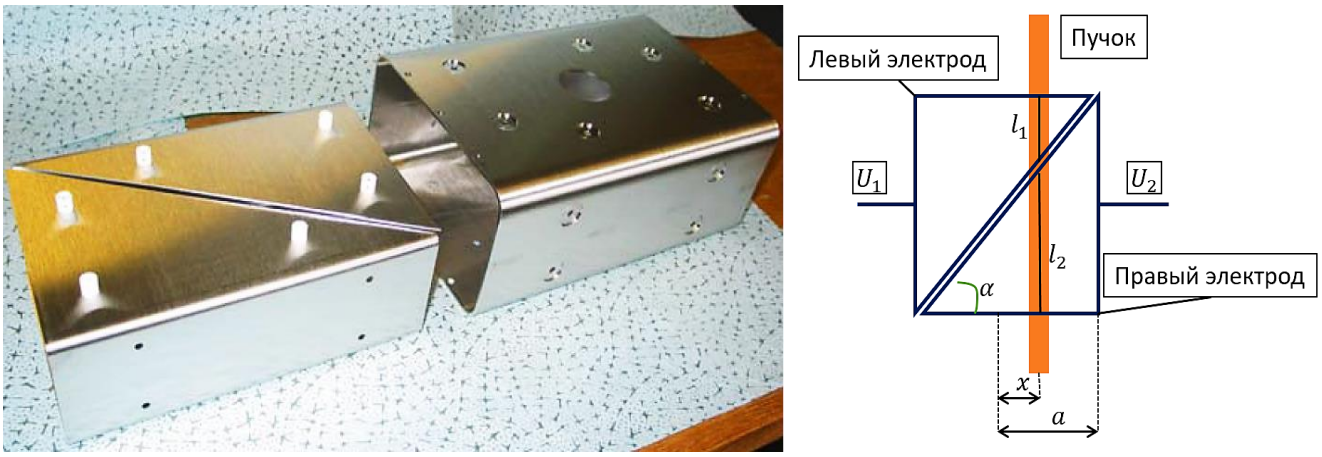


Рисунок 1.5.8 – Линейный разрезной ДПП и его принципиальная схема

В случае, когда продольный размер сгустка сокращается и становится сравним с длиной пик-ап электрода, электростатический ёмкостный подход, используемый для пуговичных и разрезных ДПП, оказывается неприменим, потому что конечное время распространения сигнала в линии приводит к его искажению, т. е. чем короче сгустки, тем короче должны быть электроды, и тем меньше становится полезный измеряемый сигнал. Альтернативой пуговичным датчикам для пучков с короткими сгустками, которые можно аппроксимировать бегущей ТЕМ-волной, является полосковый ДПП (Рисунок 1.5.9) [99], часто используемый как в кольцах коллайдеров, благодаря зависимости сигнала от направления распространения тока пучка, так и на линаках с малой длительностью сгустков, благодаря минимальным искажениям и большим сигнальным значениям. В настоящее время ДПП данного типа являются основными на линаках отрицательных ионов водорода крупнейших исследовательских центров по всему миру: SNS LINAC ORNL (США) [101], J-PARC LINAC (Япония) [102], LINAC4 CERN (Швейцария) [103]. В таблице 1.5.1 приведено краткое сравнение трех типов ДПП по основным эксплуатационным характеристикам.

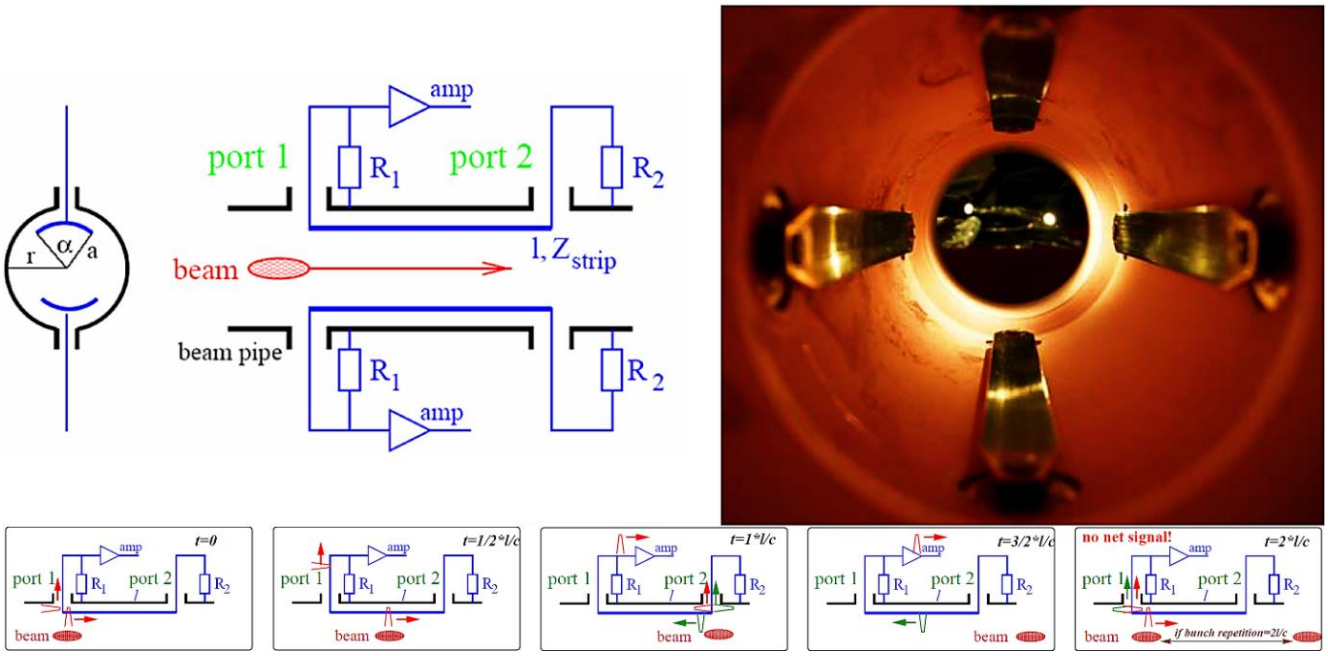


Рисунок 1.5.9 – Схема работы и фотография полоскового ДПП

Таблица 1.5.1 – Сравнение параметров пуговичного, полоскового и разрезного ДПП

Тип ДПП	**Пуговичный**	**Полосковый**	**Разрезной**
Тип ускорителя	ионные линаки, электронные ускорители	ионные и электронные линаки, коллайдеры	ионные синхротроны, разгруппированные пучки
Длина	$L_{сгустка} > L_{ДПП}$ (Ø 5÷50 мм)	$L_{сгустка} < L_{ДПП}$ (50÷300 мм)	$L_{сгустка} > L_{ДПП}$ (100÷200 мм)
Амплитуда сигнала	~ 0.5÷5 мВ/мА	~ 1÷10 мВ/мА	~ 10÷100 мВ/мА
Линейный диапазон	< 15% апертуры	< 50% апертуры	< 80% апертуры
Чувствительность	< 10 %/мм	< 10 %/мм	< 90%/апертура
Разрешение	> апертура·10^{-5}	> апертура·10^{-4}	> апертура·10^{-3}
Полоса пропускания	~ 100 ÷ 5000 МГц	широкополосный	~ 0 ÷ 100 МГц
Ёмкость	рабочая ~ 1÷10 пФ	фильтрующая ~ 1÷10 пФ	рабочая ~ 10÷100 пФ
Конструкция	простая – геометрия	сложная – согласование	сложная – геометрия
Особенности	компактность	направленность сигнала	электростатический режим

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Одной из модификаций полосковых ДПП, наиболее часто используемой на ионных линаках для пучков с нерелятивистскими скоростями (энергия < 500 МэВ/нуклон), является так называемый «короткозамкнутый» полосковый ДПП, в котором выходной порт заменяется коротким замыканием на корпус датчика, что обеспечивает более простую, компактную и дешевую конструкцию. Схема работы такой модификации ДПП показана на рисунке 1.5.10.

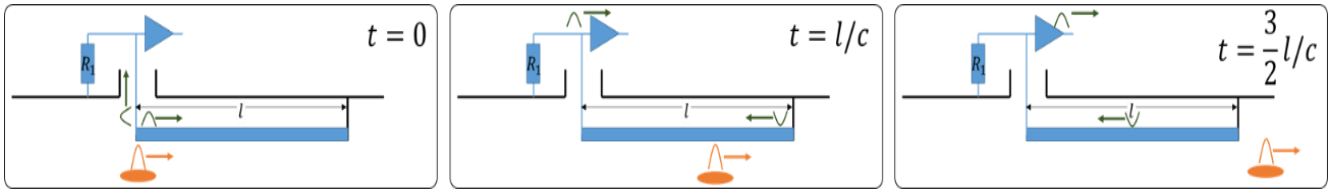


Рисунок 1.5.10 – Схема работы короткозамкнутого полоскового ДПП

В момент времени $t = 0$ пучок проходит передний край полосковой линии, где ток изображения генерирует импульс, разделяющийся на две половины. Один импульс половинной амплитуды направляется к сигнальному порту, а второй импульс движется вдоль полосковой линии со скоростью света, в то время как импульс тока изображения двигается по линии вместе с пучком. В момент времени $t = l/c$ второй импульс достигает закоротки, отражается от неё, меняя полярность, и начинает двигаться в обратном направлении к сигнальному порту. В момент времени $t = l/\beta c$ импульс тока изображения пучка достигает закоротки, но не создает никаких новых импульсов на полосковой линии, а просто переходит по закоротке на корпус датчика. Следовательно, временной интервал между двумя импульсами, пришедшими на сигнальный порт короткозамкнутого полоскового ДПП, равен $\Delta t = 2l/c$ и не зависит от скорости пучка.

Типичные короткозамкнутые ДПП, оптимизированные для работы на 1й и 2й гармониках ускоряющего поля в ионных линаках, используют полосковые линии длиной ~50÷100 мм с угловым размером ~45º÷60º, обеспечивая пространственное разрешение ~50÷100 мкм для контроля положения пучка в рабочей апертуре 20÷30 мм и временно́е разрешение ~50÷100 пс для проведения фазовых измерений и времяпролетных процедур. В случае протяженных высокоэнергичных линаков, таких как SNS или ESS, прибегают к использованию системы из разных типов ДПП. Например, на протонном линаке ESS планируется установить согласованные полосковые ДПП в квадрупольных линзах канала MEBT, короткозамкнутые полосковые ДПП внутри трубок дрейфа участка DTL, по аналогии с линаком SNS, а в оставшейся части ускорителя использовать пуговичные конфигурации ДПП с разным диаметром электродов (Рисунок 1.5.11) [104].

Для установки ДПП внутри квадрупольных линз без уменьшения эффективной апертуры можно разместить полосковые линии в зазорах между полюсами квадруполя. Пример подобной конфигурации показан на рисунке 1.5.12, где приведены модели и фотографии полосковых ДПП, разработанных для установки в канале MEBT ESS [105].

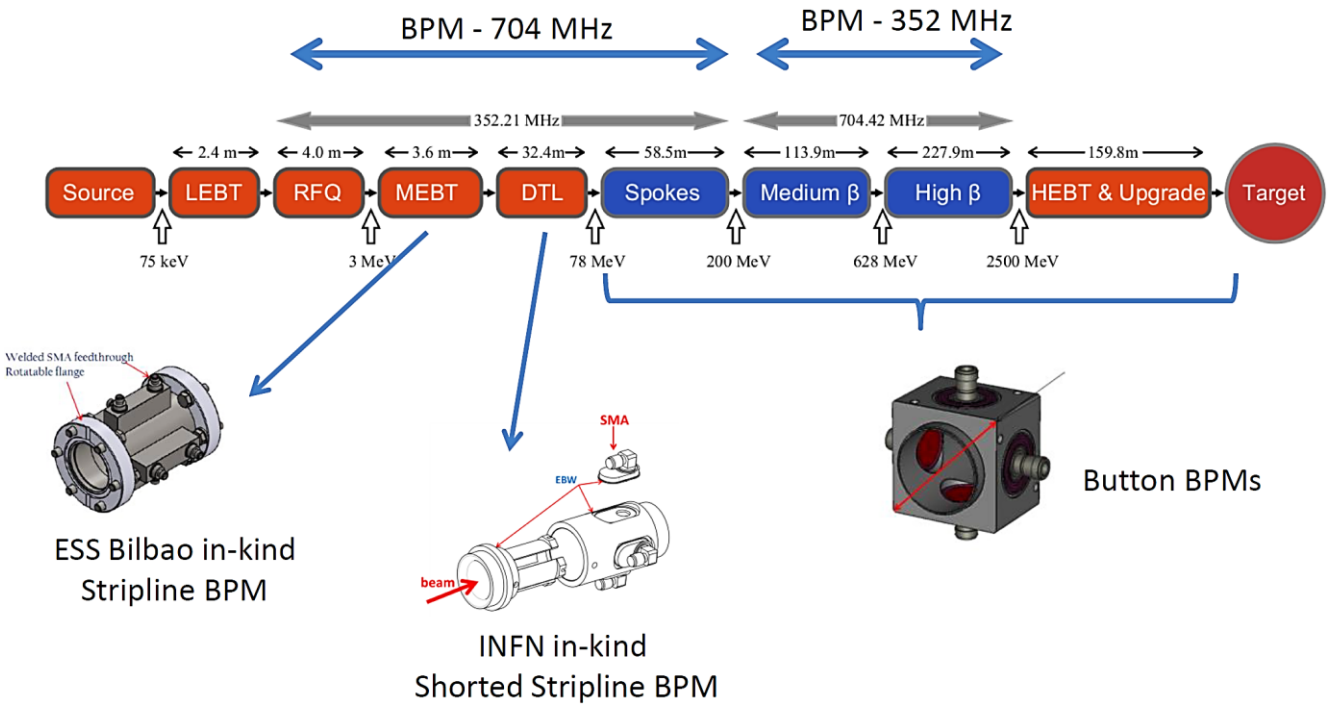


Рисунок 1.5.11 – Схема расстановки ДПП вдоль ЛУ ESS

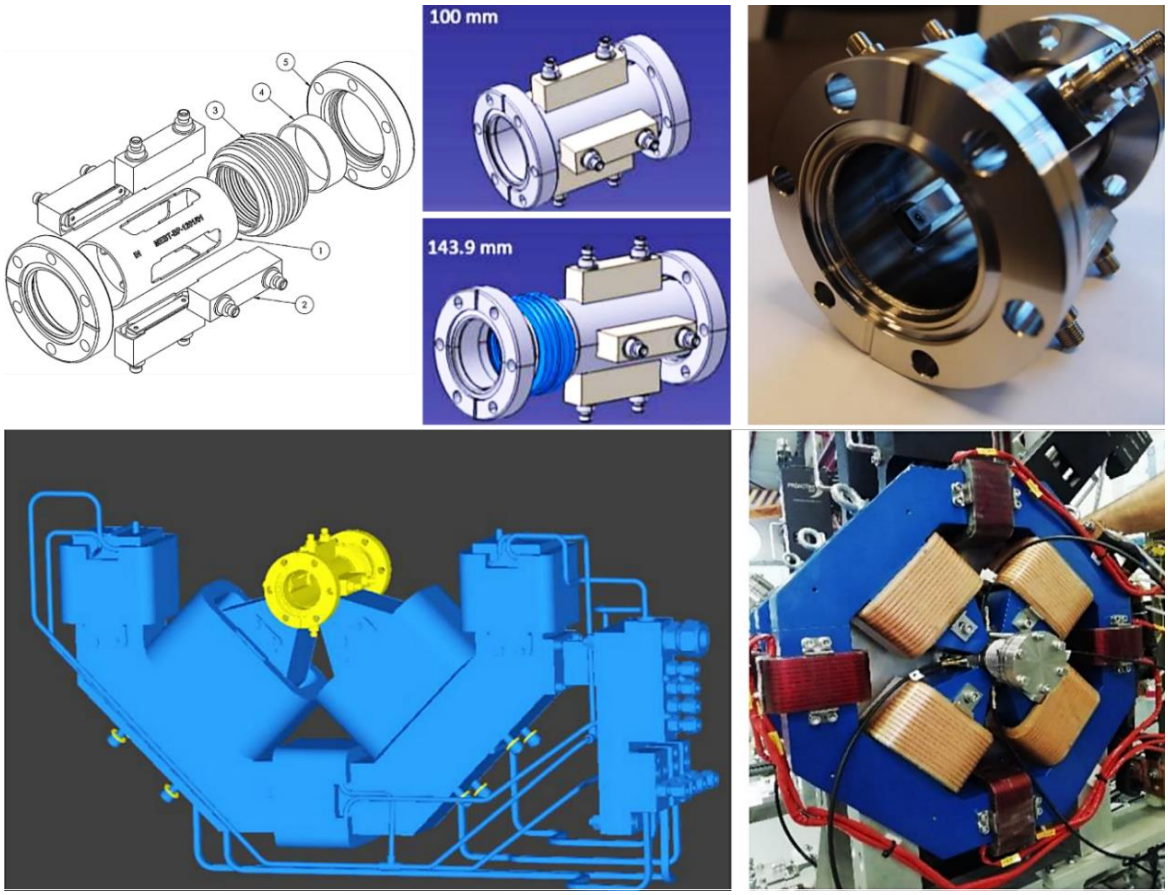


Рисунок 1.5.12 – Согласованные (50 Ом) полосковые ДПП, разработанные для установки в квадрупольных линзах канала MEBT ESS

ДПП сконструированы для работы на 2й гармонике (704.4 МГц) ускоряющей частоты и изготовлены методом электронно-лучевой сварки основных составляющих: корпус, узлы полосковых линий, SMA-вводы, сильфон, фланцы. По проекту, для размещения датчиков необходимо демонтировать верхнюю половину квадрупольной линзы, а после установки и предварительного выравнивания ДПП, установить ее на место. При этом итоговое позиционирование датчиков предлагается осуществлять методом юстировки по динамике пучка (англоязычный термин: BBA – beam-based alignment) [106].

Типичным примером конструкции короткозамкнутых ДПП является дизайн короткозамкнутых полосковых датчиков LINAC4 CERN (Рисунок 1.5.13) [107], которые представляют собой цилиндрические ДПП с одной парой электродов на каждую плоскость. Электроды выполнены в виде полосковых линий с волновым сопротивлением 50 Ом, угловым размером 45º и длиной от 34 до 140 мм в зависимости от места установки датчика. Также для фильтрации рабочей ВЧ-гармоники 352.2 МГц и подавления паразитных резонансов на электродах сделаны утолщения для формирования дополнительной ёмкости между электродами и корпусом, работающие как фильтры нижних частот.

Рисунок 1.5.13 – Короткозамкнутый полосковый ДПП для DTL LINAC4 CERN

Современные системы измерения положения и фазы пучка в линейных ускорителях ионов опираются на сочетание ВЧ-электроники и математической обработки, где I/Q демодуляция является основным методом вычисления амплитуды и фазы сигнала.

Первым звеном в считывании сигнала является предусилительная электроника, отвечающая за приём слабого сигнала с электродов, его первичное усиление, фильтрацию и преобразование в удобную для оцифровки промежуточную частоту. От качества этого оборудования зависят динамический диапазон, уровень шума и линейность всей системы.

Далее сигнал чаще всего понижается до промежуточной частоты и подается на вход I/Q демодулятора. Понижение происходит за счет смешивания исходного высокочастотного сигнала с сигналом локального гетеродина и дальнейшей полосовой фильтрации. Ключевая идея I/Q-демодуляции – представить гармонический сигнал $U(t) = A\cos(\omega t + \varphi)$ в виде суммы синфазной ($I = -A\sin\varphi$) и квадратурной ($Q = A\cos\varphi$) компонент:

$$U(t) = A\cos(\omega t + \varphi) = A\cos\varphi\cos\omega t - A\sin\varphi\sin\omega t \tag{1.5.5}$$

Тогда амплитуду и фазу сигнала можно рассчитать по формулам:

$$\mathrm{A} = \sqrt{Q^2 + I^2} \tag{1.5.6}$$

$$\varphi = \mathrm{arctg}\left(\frac{Q}{I}\right) \tag{1.5.7}$$

Для получения данных компонент из сигналов с портов ДПП используется аналоговая или цифровая I/Q-демодуляция, в основе которой лежит перемножение исходного сигнала на сигнал гетеродина.

Схема аналоговой демодуляции представлена на рисунке 1.5.14 [108]. В аналоговом методе входной гармонический сигнал разделяют на два канала и умножают на соответствующий опорный сигнал, который генерирует одновременно синусную (I-канал) и косинусную (Q-канал) компоненты на частоте считывания:

$$A\cos(\omega t + \varphi)\cdot\cos(\omega t) = \frac{1}{2}A[\cos(2\omega t + \varphi) + \cos\varphi] \tag{1.5.8}$$

После прохождения сигналов через фильтры нижних частот, отсекающих гармоники при 2ω, остаются медленно меняющиеся сигналы Q = (A/2) cosφ и I= (A/2) sin φ, из которых восстанавливают амплитуду и фазу исходного сигнала.

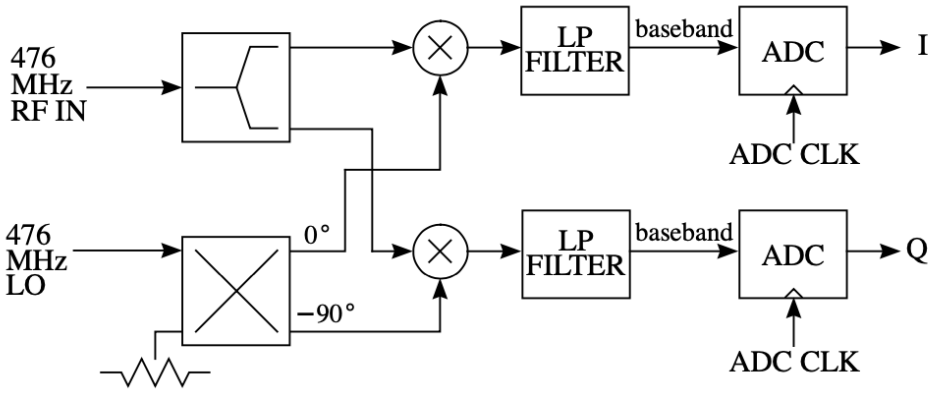


Рисунок 1.5.14 – Схема аналоговой I/Q-демодуляции

В современных ускорителях чисто аналоговая I/Q демодуляция практически не применяется – ей на смену пришли гибридные и полностью цифровые схемы.

В цифровой I/Q демодуляции высокочастотный сигнал оцифровывается АЦП с частотой выборки $f_s = 1/T_s \geq 2 \cdot f$ для предотвращения наложения спектров:

$$U[n] = U(nT_s) = A\cos(\omega n T_s + \varphi) \tag{1.5.9}$$

После этого вся обработка происходит в ПЛИС (FPGA). В генераторе с числовым программным управлением (NCO) синтезируются дискретные опорные сигналы $\cos(n\omega T_s), \sin(n\omega T_s)$ и умножаются на оцифрованный сигнал. Для удаления гармоник 2ω и снижения частоты дискретизации используются цифровые CIC и FIR фильтры. В результате остаются Q=(A/2) cosφ и I=(A/2) sin φ, по которым вычисляется амплитуда и фаза исходного сигнала.

Можно получить цифровые I и Q компоненты без умножения на опорные сигналы, выбирая отсчеты АЦП в моменты, когда одна из составляющих обнуляется. Если установить моменты выборки $t_s = \frac{n}{4f}, n \in Z$ (или с частотой $4f$), то можно получить значения I и Q:

$$U[n] = A\cos(2\pi f\frac{n}{4f} + \varphi) = A\cos\left(\frac{\pi n}{2} + \varphi\right) \tag{1.5.10}$$

Отсчеты, определяемые соотношением 1.5.10, являются чистыми I и Q компонентами сигнала (Рисунок 1.5.15).

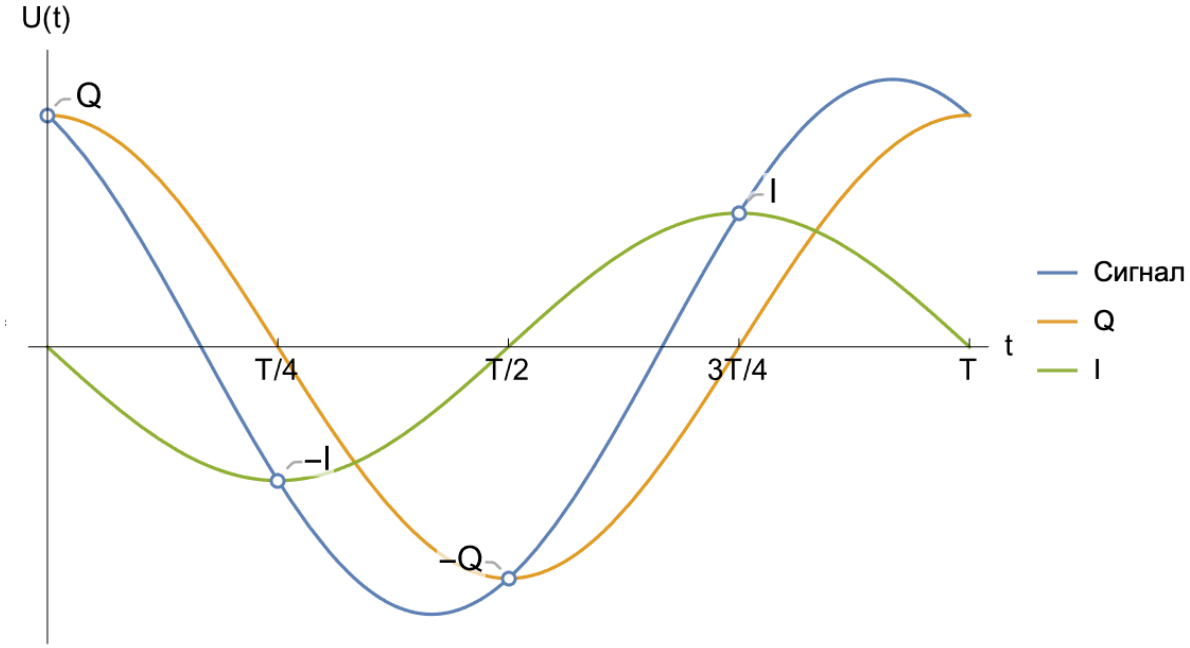


Рисунок 1.5.15 – Принцип цифровой I/Q демодуляции

Цифровой подход имеет плюсы в сравнении с аналоговым: отсутствие температурных дрейфов и гибкость в изменении конфигураций фильтров. При этом главным недостатком такой обработки являются высокие требования к частоте дискретизации и динамическому диапазону АЦП, поэтому часто применяется гибридный подход – аналоговое понижение сигнала до промежуточной частоты и цифровая I/Q демодуляция. Это снижает требования к АЦП, сохраняя при этом гибкость подхода на основе цифровых фильтров.

Гибридный подход наиболее распространен в современных ускорительных комплексах. Например, в SNS аналоговая электроника, понижающая сигнал до промежуточной частоты 50 МГц сочетается с АЦП 40 МГц/14 бит и FPGA с NCO-генератором для осуществления цифровой I/Q демодуляции, что позволяет вычислять положение с микронным разрешением [109]. В ESS локальный гетеродин, аттенюаторы и усилители до 20 дБ формируют сигнал промежуточной частоты, который оцифровывается высокоскоростным АЦП с частотой 125 МГц.

После чего осуществляется цифровая I/Q-демодуляция на FPGA. Такой подход позволяет обеспечить динамический диапазон >70 дБ [110]. На линаке C-ADS применяется недосэмплирование для получения I и Q компонент. Предварительно усиленный и отфильтрованный сигнал понижается до промежуточной частоты 25 МГц и затем считывается АЦП с частотой 100 МГц, итоговое разрешение при этом составляет ~5 мкм [111]. На Linac4 CERN также сигналы проходят через программируемые аттенюаторы и малошумящие усилители и переводятся на промежуточную частоту 17.61 МГц. Частота дискретизации АЦП для осуществления I/Q демодуляции равняется 70.44 МГц (Рисунок 1.5.16) [112].

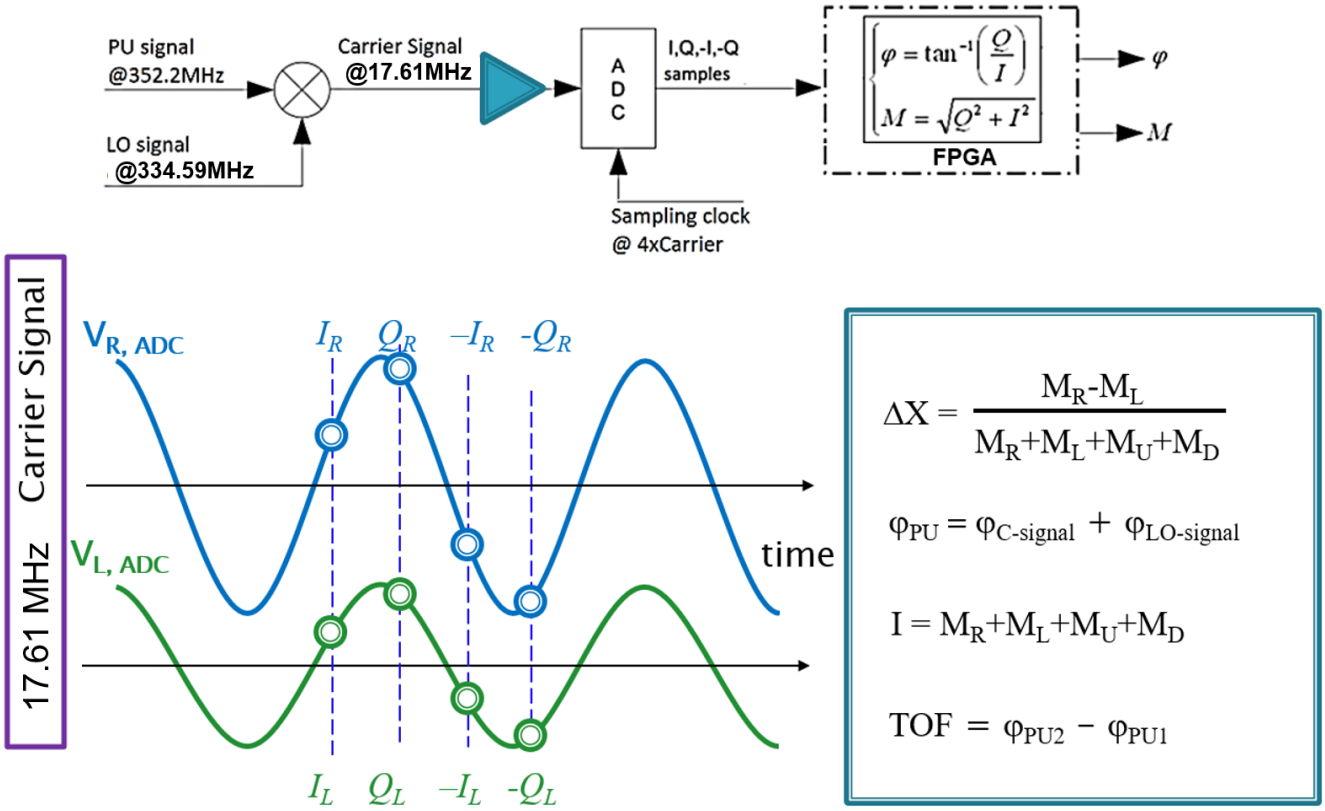


Рисунок 1.5.16 – Схема обработки сигналов пик-ап электрода методом I/Q демодуляции на LINAC4 CERN и соотношения основных измеряемых величин

1.6 Продольная микроструктура пучка

Продольные параметры пучка важны для настройки и эксплуатации ускорителя так же, как и поперечные, хотя методы их диагностики часто описаны менее подробно. Продольное фазовое пространство удобно определять двумя параметрами:

- продольный размер сгустка l в единицах времени или фазы, по аналогии с поперечным профилем пучка;
- разброс по импульсам (или по энергиям) $\delta = \frac{\Delta p}{p} = \frac{\gamma}{1+\gamma}\frac{\Delta W}{W}$ относительно импульса синхронной частицы, по аналогии с поперечным расхождением пучка. Продольный эмиттанс в этом случае равен $\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\pi}\iint dl d\delta$.

В отличие от измерений энергетического разброса, которые традиционно проводятся на основе магнитного спектрометра, совмещенного со щелевым коллиматором, экспериментальное исследование продольной микроструктуры пучка (формы сгустков) представляет существенную техническую проблему.

Фазовый размер сгустков в линейных ускорителях ионов может меняться в широком диапазоне от единиц до нескольких десятков градусов, тогда фазовое разрешение прибора для продольной диагностики таких сгустков должно быть не хуже 1°, что по теореме Котельникова соответствует десяткам гигагерц полосы пропускания. Например, на частоте следования сгустков 352.2 МГц эквивалентная полоса пропускания для фазового разрешения $\Delta\varphi = 1°$ равна $\Delta F \sim 63$ ГГц, что является трудно достижимым на практике значением для таких приборов, как пикапы (емкостные датчики положения пучка), резистивные датчики стеночного тока, быстрые (пассивные) индукционные датчики тока и цилиндры Фарадея.

В связи с этим, для проведения подобных измерений, как правило, разрабатываются специализированные измерители формы сгустков, представляющие собой отдельный класс устройств диагностики пучка [113].

Следует отметить, что фазовый спектр пучка на входе ускоряющего резонатора можно измерить без применения специальных устройств диагностики. Для этого на выходе резонатора измеряется зависимость импульсного тока ускоренного в резонаторе пучка от сдвига фазы ускоряющего поля. При попадании сгустка частиц в область устойчивости происходит возрастание тока ускоренного пучка, и производная измеренной функции по фазе представляет собой фазовый спектр пучка на входе резонатора. К недостаткам этого метода следует отнести необходимость расстройки ускоряющего резонатора, полную потерю пучка в процессе измерений и невысокую точность получаемых результатов.

Измеритель формы сгустков (фазовый анализатор)

Для линейных ускорителей ионов, в которых пучки нельзя считать ультрарелятивистскими, существует принципиальное ограничение полосы пропускания измерителей, работающих на основе анализа электромагнитного излучения диагностируемого пучка. В таких устройствах потеря информации происходит уже на стадии преобразования временно́й (фазовой) структуры сгустка во временну́ю зависимость излучаемого электромагнитного поля, что делает их непригодными для измерения фазового спектра сгустка с требуемым разрешением. На рисунке 1.6.1 показано схематическое распределение электрического поля заряженной частицы, движущейся в трубе с электропроводящими стенками. Длительность импульса электромагнитного поля, излучаемого такой частицей в бесконечно узкий кольцевой зазор, зависит от энергии частицы и равна $\Delta t \sim {R\sqrt{2}}/{\gamma\beta c}$, что, например, при энергии протонов 7.5 МэВ и радиусе $R = 3$ см соответствует полосе всего 0.9 ГГц.

Таким образом, для создания прибора с достаточной шириной полосы пропускания необходимо существенно ограничить область пространства, в которой происходит передача информации о временной структуре сгустка.

Такое ограничение можно обеспечить, если ввести в пучок некую мишень малых размеров и регистрировать вторичные излучения, возникающее при взаимодействии мишени с пучком: переходное излучение, вторичные низкоэнергетические электроны, δ-электроны, излучение Вавилова-Черенкова и т. д.

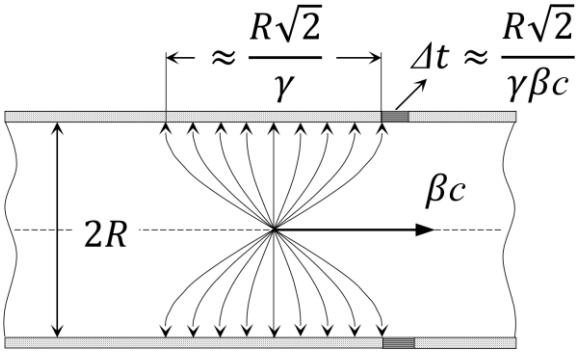


Рисунок 1.6.1 – Схематическое распределение электрического поля заряженной частицы, движущейся в трубе с электропроводящими стенками

Физические принципы работы и типичные характеристики

Практическое применение для диагностики продольной микроструктуры пучков в линейных ускорителях ионов нашли только методы на основе вторичных низкоэнергетических электронов, свойства которых, важные при измерениях фазового спектра сгустков, практически не зависят ни от типа частиц, ни от энергии диагностируемого пучка. В связи с этим детекторы, использующие вторичные низкоэнергетические электроны, оказываются применимы для измерений на любых пучках ионов без существенных модификаций [113, 114].

Список базовых требований к характеристикам и конфигурации такого измерителя формы сгустков можно сформулировать следующим образом:

- Фазовое разрешение должно быть не хуже единиц градусов на частоте следования сгустков.
- Фазовый диапазон измерений должен быть больше фазовой протяженности анализируемых сгустков, которая, как правило, не превышает несколько десятков градусов. Однако для наблюдений продольного ореола сгустка требуется диапазон, равный не менее половины и даже целого периода.

- Амплитудное разрешение определяется точностью измерений формы фазового спектра и должно быть не хуже единиц процентов.
- Амплитудный диапазон измерений по току анализируемого пучка должен составлять несколько порядков для диагностики продольного ореола.
- Мишень измерителя должна иметь минимальную толщину при повышенной термо- и радиационной стойкости и выводиться за пределы апертуры ионопровода после окончания измерений для уменьшения рассеяния анализируемого пучка и обеспечения длительного ресурса эксплуатации.
- Общие габариты и вес измерителя должны быть минимизированы, так как принципиальная возможность его использования в процессе наладки ускорителя зависит от того, может ли он быть установлен в ограниченном пространстве между элементами магнитооптики и/или резонаторами.

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Первый работающий на практике анализатор фазового спектра на основе вторичных низкоэнергетических электронов был создан Р. Л. Витковером в лаборатории BNL [115]. Принцип действия детектора поясняется на рисунке 1.6.2.

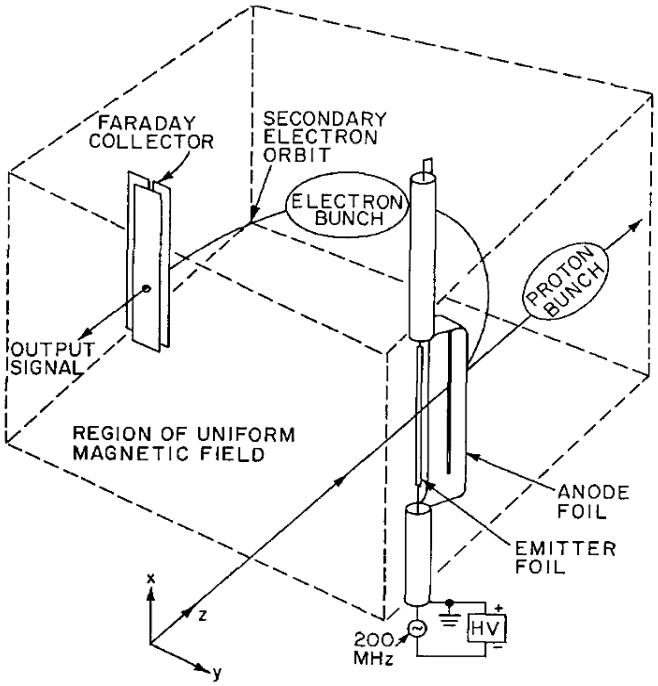


Рисунок 1.6.2 – Схема работы анализатора Витковера с продольной ВЧ модуляцией

Пучок ионов проходит через тонкую узкую мишень и выбивает низкоэнергетические электроны вторичной эмиссии. В зазоре между мишенью и анодной фольгой создается суперпозиция ускоряющего электростатического поля и модулирующего высокочастотного поля, синхронизированного с частотой следования сгустков и модулирующего электроны по энергии. Пройдя через щель в фольге, электроны приобретают энергию, зависящую от момента времени вылета из мишени, и попадают в магнитное поле, где разделяются по энергии. Таким образом осуществляется преобразование временной структуры анализируемого сгустка в пространственную структуру сгустка вторичных низкоэнергетических электронов путем их модуляции по энергии, то есть в продольном направлении.

Помимо продольной также возможна и поперечная модуляция вторичных низкоэнергетических электронов. При поперечной модуляции скорость электронов модулируется ВЧ полем в поперечном направлении, приводя к их отклонению в зависимости от фазы. Преобразование временной структуры в пространственную происходит на участке дрейфа после ВЧ дефлектора. Измерители на основе линейной поперечной модуляции стали изготавливаться в ИЯИ РАН под руководством А. В. Фещенко с 1980-х годов.

Физический принцип работы измерителя подробно изложен в [113] и схематически изображен на рисунке 1.6.3. Серия сгустков анализируемого пучка пересекает мишень 1, представляющую собой вольфрамовую проволоку диаметром 0.1 мм, находящуюся под высоким отрицательным потенциалом $U_м \sim -10$ кВ. Взаимодействие анализируемого ионного пучка с мишенью вызывает эмиссию вторичных низкоэнергетических электронов, характеристики которых практически не зависят от типов и энергии первичных ионов, поэтому ИФС может использоваться для разных энергий исследуемого пучка вдоль линака.

Вторичные электроны ускоряются электростатическим полем и двигаются практически радиально от мишени. Часть этих электронов проходит через входной коллиматор 2 шириной ~1 мм и попадает в высокочастотный дефлектор 3, совмещенный с электростатической линзой.

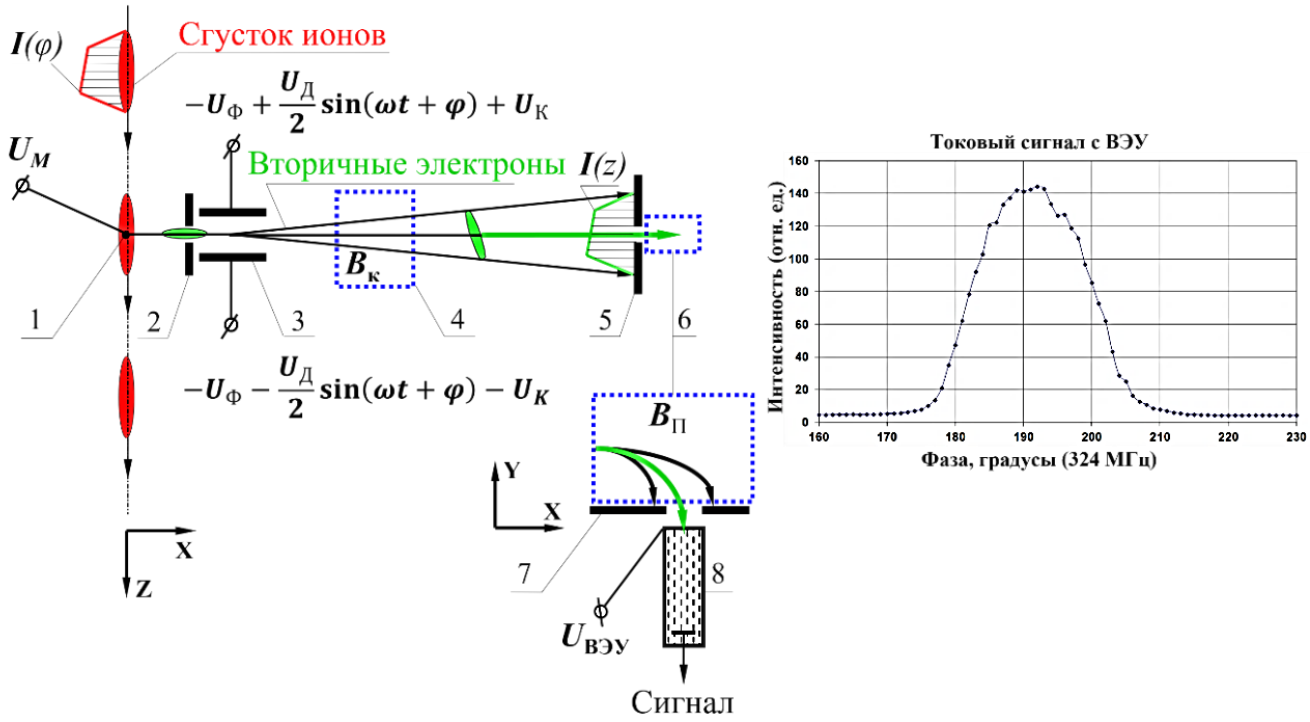


Рисунок 1.6.3 – Схема, поясняющая физические принципы работы измерителя формы сгустков: 1 – мишень, 2 – входной коллиматор, 3 – ВЧ дефлектор, 4 – корректирующий магнит, 5 – выходной коллиматор, 6 – поворотный магнит, 7 – регистрирующий коллиматор, 8 – вторично-электронный умножитель

Электрическое поле в дефлекторе представляет собой суперпозицию высокочастотного отклоняющего поля с амплитудой напряжения между пластинами $U_Д$ и электростатического фокусирующего поля, для формирования которого на пластины дефлектора подается отрицательный потенциал $-U_Ф$. Частота отклоняющего поля равна частоте следования сгустков. Между пластинами также создается дополнительное напряжение $\pm U_K$ для коррекции траекторий электронов.

Благодаря малой задержке времени возникновения вторичной эмиссии и большой напряженности электростатического поля вблизи проволоки временная структура потока вторичных электронов на входе в дефлектор практически идентична временной структуре первичного пучка. Когда отклоняющее ВЧ-поле выключено, электронный пучок сфокусирован, и все электроны имеют фиксированную координату Z_0 в плоскости выходного коллиматора 5 шириной ~1 мм.

В общем случае координата Z_0 не совпадает с координатой выходного коллиматора $Z_К$. При включении ВЧ-поля электроны отклоняются под его воздействием, и их координаты Z зависят от фазы поля следующим образом:

$$Z = Z_0 + Z_{макс} \sin\varphi \,. \tag{1.6.1}$$

На участке дрейфа от дефлектора до выходного коллиматора продольная (временна́я) структура первичного пучка $I(\varphi)$ трансформируется в пространственное распределение вторичных электронов $I(Z)$. Интенсивность потока электронов, проходящего через выходной коллиматор 5, представляет собой фиксированную точку в продольном распределении $I(\varphi)$ для фазы:

$$\varphi = \arcsin\frac{Z_К - Z_0}{Z_{макс}} \,. \tag{1.6.2}$$

Другие точки могут быть получены изменением фазы отклоняющего поля по отношению к опорному ВЧ-сигналу ускорителя, при этом, если фаза отклоняющего поля регулируется в достаточно широком диапазоне, то сгусток регистрируется дважды за период. При этом фазовое расстояние между соседними наблюдаемыми сгустками на частоте отклоняющего ВЧ-поля равны $\pi + 2 \cdot \arcsin\frac{Z_К - Z_0}{Z_{макс}}$ и $\pi - 2 \cdot \arcsin\frac{Z_К - Z_0}{Z_{макс}}$. В общем случае при $Z_К \neq Z_0$ наблюдаемые сгустки расположены по фазе бипериодически. Изменяя Z_0 регулировкой напряжения $U_К$, можно менять наблюдаемое фазовое положение сгустков и в случае $Z_К = Z_0$ достичь периодичности 180° на частоте отклоняющего ВЧ-поля.

Результаты измерений могут быть искажены влиянием электронов, образующихся в процессе обдирки многозарядных ионов пучка при прохождении через мишень. Сигнал от электронов обдирки складывается с полезным сигналом и искажает измеряемую форму сгустка, однако энергия таких электронов отличается от энергии электронов вторичной эмиссии, поэтому эти две группы электронов могут быть разделены. Для этого используется поворотный магнит 6, установленный после выходного коллиматора 5. Угол отклонения в магните составляет 90°. Разрешение такого спектрометра, в основном, определяется

размером регистрирующего коллиматора 7 и выбирается достаточно низким, около 10%, для упрощения настройки прибора и уменьшения возможных потерь интенсивности потока низкоэнергетических вторичных электронов на коллиматоре.

Относительно низкое энергетическое разрешение (~10%) используемого 90° магнита 6 определяется в основном размерами регистрирующего коллиматора 7, позволяя избежать потерь интенсивности потока низкоэнергетических вторичных электронов. Величина магнитного поля выбирается в зависимости от потенциала мишени U_{M} и регулируется изменением тока в обмотке магнита. После прохождения регистрирующего коллиматора электроны детектируются вторично-электронным умножителем 8, усиление которого регулируется в широком диапазоне путем изменения напряжения питания и достигает ~ 10^6.

Опыт работы с измерителями формы сгустков показывает, что в ряде случаев в плоскости выходного коллиматора происходит смещение пучка электронов в направлении оси Y, что уменьшает полезный сигнал, и наклон изображения пучка в плоскости YZ, что ухудшает фазовое разрешение. Причинами этих эффектов являются как погрешности изготовления и сборки измерителя, так и влияние внешних магнитных полей. Для компенсации этих эффектов в составе прибора предусмотрен корректирующий магнит 4 с комбинацией дипольного и квадрупольного полей.

Базовый вариант конфигурации прибора получил название «анализатор фазового спектра» или «измеритель формы сгустков» (Bunch Shape Monitor, BSM) [3, 38] – детектор для наблюдения продольного распределения заряда в сгустках. К настоящему моменту создано 39 измерителей разных модификаций для ведущих ускорительных центров мира: ИЯИ РАН, Fermilab, SSC, CERN, DESY, KEK, J-PARC, SNS, LANSCE, FRIB MSU, GSI-FAIR, ESS, MYRRHA. Созданные детекторы работают на пучках протонов, отрицательных ионов водорода и тяжелых ионов в диапазоне энергий от 2.5 до 1000 МэВ/нуклон и считаются в международном диагностическом сообществе эталоном в области измерения продольного профиля сгустков в линейных ускорителях ионов (Рисунок 1.6.4).

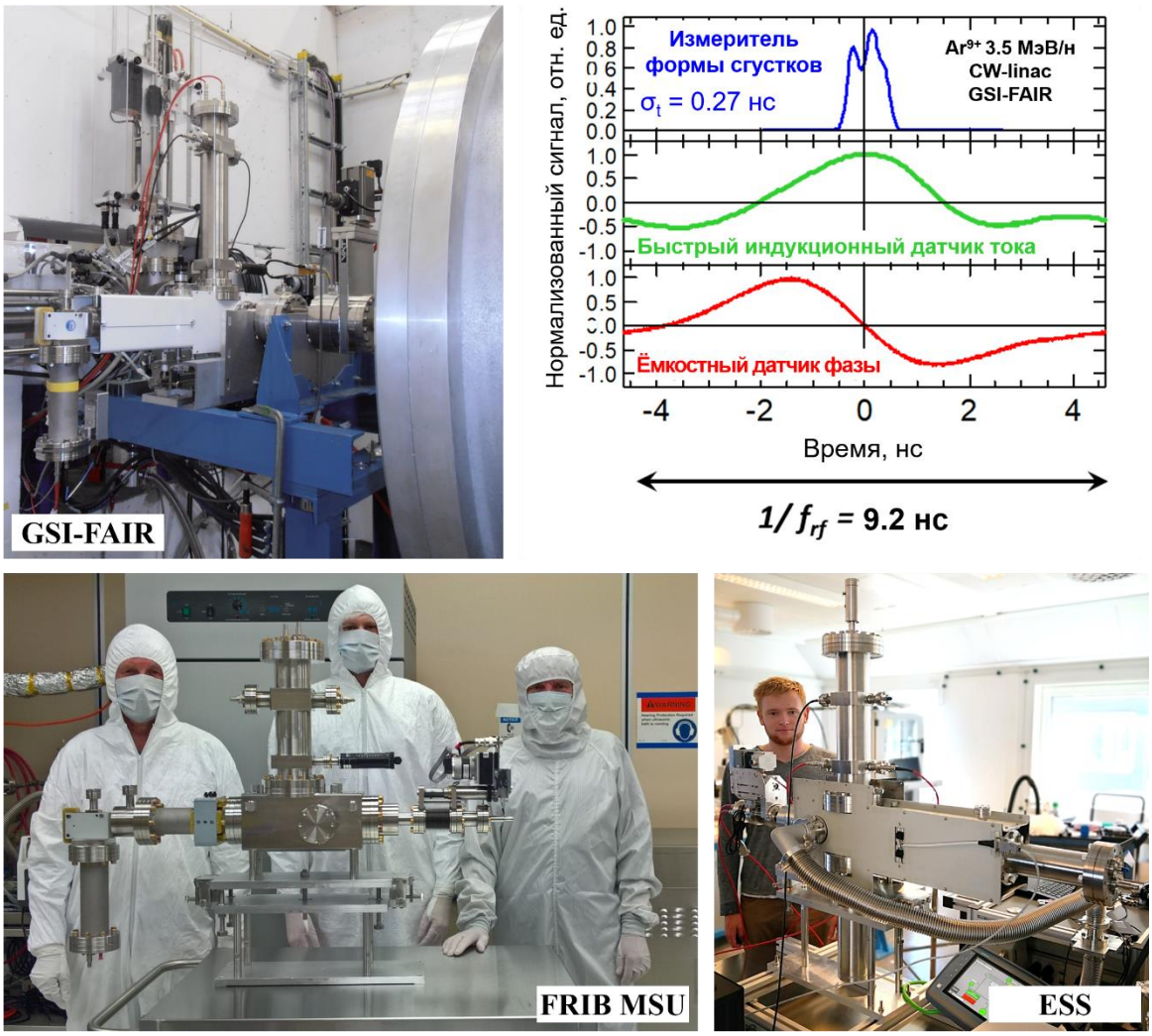


Рисунок 1.6.4 – Модификации ИФС ИЯИ РАН для различных ускорителей. Люди слева направо: А. В. Фещенко, С. А. Гаврилов, В. А. Гайдаш, А. И. Титов

Кроме того, в большинстве разработанных измерителей имеется возможность регистрировать форму импульсов тока вторичных электронов, что позволяет наблюдать эволюцию формы сгустков в течение импульса тока исследуемого пучка (Рисунок 1.6.5 а). Эта характеристика может использоваться как обобщенный критерий правильной работы всех систем ускорителя, влияющих на продольную динамику пучка, в том числе и систем стабилизации амплитуд и фаз полей в ускоряющих резонаторах.

Также, в совокупности с методикой сканирования фаз ускоряющих ВЧ-резонаторов, измерители позволяют восстанавливать продольный эмиттанс пучка в виде эквивалентных фазовых эллипсов (Рисунок 1.6.5 б) [116].

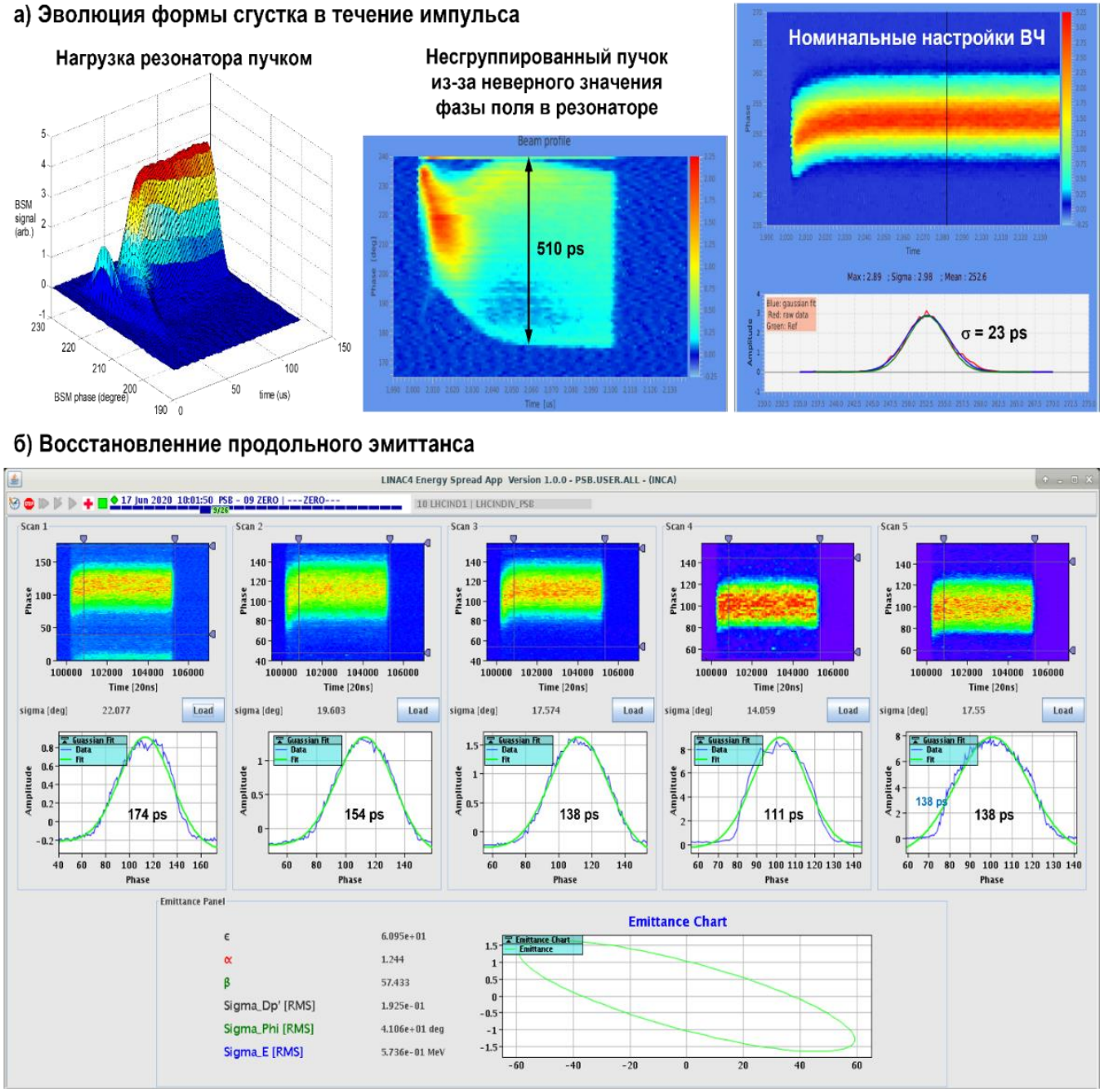


Рисунок 1.6.5 – Примеры экспериментальных результатов процедур продольной диагностики пучка с помощью ИФС ИЯИ РАН на LINAC4 CERN

BSM позволяет осуществлять контроль и таких сложных процедур, проводимых с пучком на современных ускорителях, как например, процедура модуляции энергии пучка (Рисунок 1.6.6) [116] в LINAC4 CERN, планируемая для эффективного заполнения сепаратрисы бустера, размер которой по энергии намного превышает разброс по энергиям в пучке линейного ускорителя.

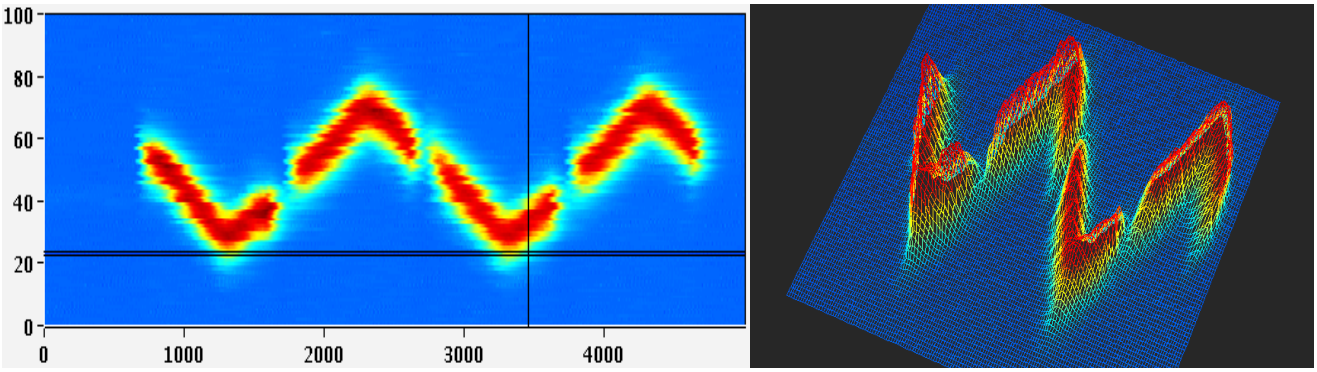


Рисунок 1.6.6 – Результаты измерений эволюции формы сгустков в течение импульса тока пучка LINAC4 CERN, чоппированного для обеспечения многооборотной инжекции в бустер в режиме модуляции энергии

Для ИЯИ РАН, SNS ORNL и JHP KEK А. В. Фещенко были разработаны методы измерений продольного ореола сгустка (Рисунок 1.6.7) [113]. Получаемые таким образом результаты имеют особое значение для ускорителей с высокой интенсивностью, поскольку наличие ореола приводит к потерям пучка.

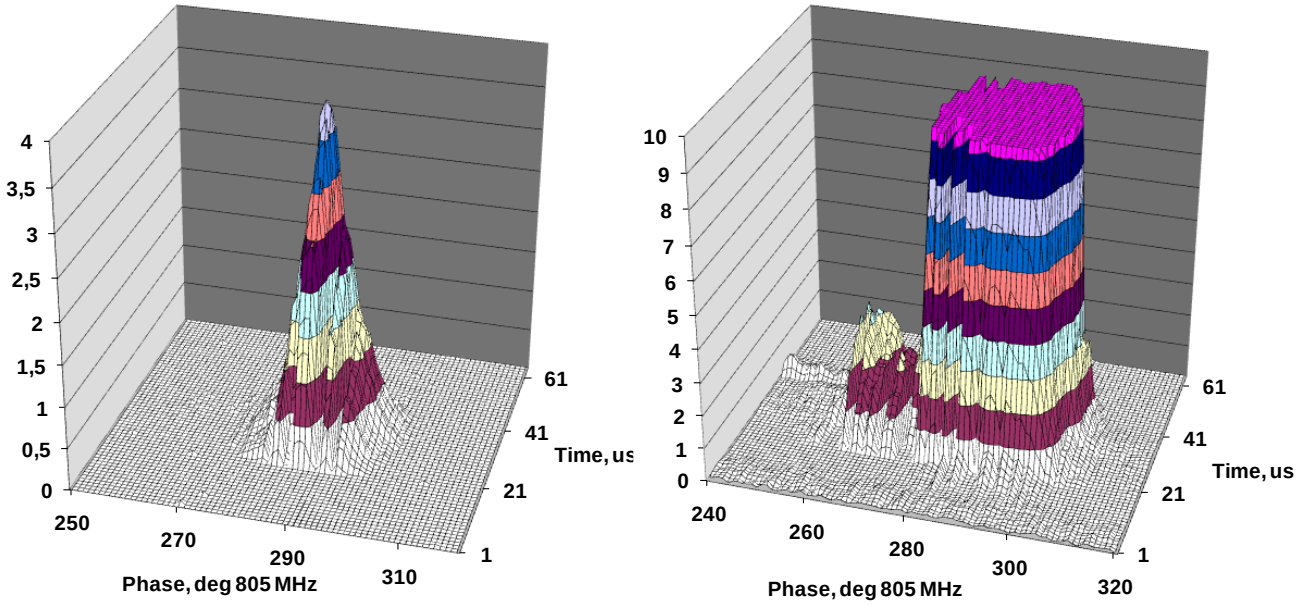


Рисунок 1.6.7 – Результаты измерений продольного ореола сгустков в первом резонаторе CCL SNS, проведенных с номинальным коэффициентом усиления вторично-электронного умножителя BSM и со 160-кратным усилением

1.7 Потери пучка

Прохождение пучка от источника до выхода ускорителя никогда не достигает 100%, и чем больше запасенная в пучке мощность, тем важнее осуществление непрерывного контроля потерь пучка, так как в современных высокоинтенсивных линейных ускорителях ионов потери даже «низкоэнергетического» пучка могут приводить к термомеханическим повреждениям элементов ионопровода.

Распространенным на сильноточных линейных ускорителях ионов (ИЯИ РАН, SNS, LANSCE, ISIS, HIPA PSI, J-PARC, LINAC4, ESS) правилом является сохранение потерь пучка на уровне, при котором локальная мощность дозы наведенной радиоактивности не превышает значение ~ 1 мЗв/час (100 мбэр/час) суммарно от всех источников, для того чтобы дальнейшее обслуживание машины могло осуществляться персоналом ускорителя вручную. Эмпирически эта величина, как правило, соответствует средним потерям пучка ~1 Вт/м в высокоэнергетической части линейного ускорителя – ориентировочная расчетная зависимость от энергии пучка приведена рисунке 1.7.1 для меди [117].

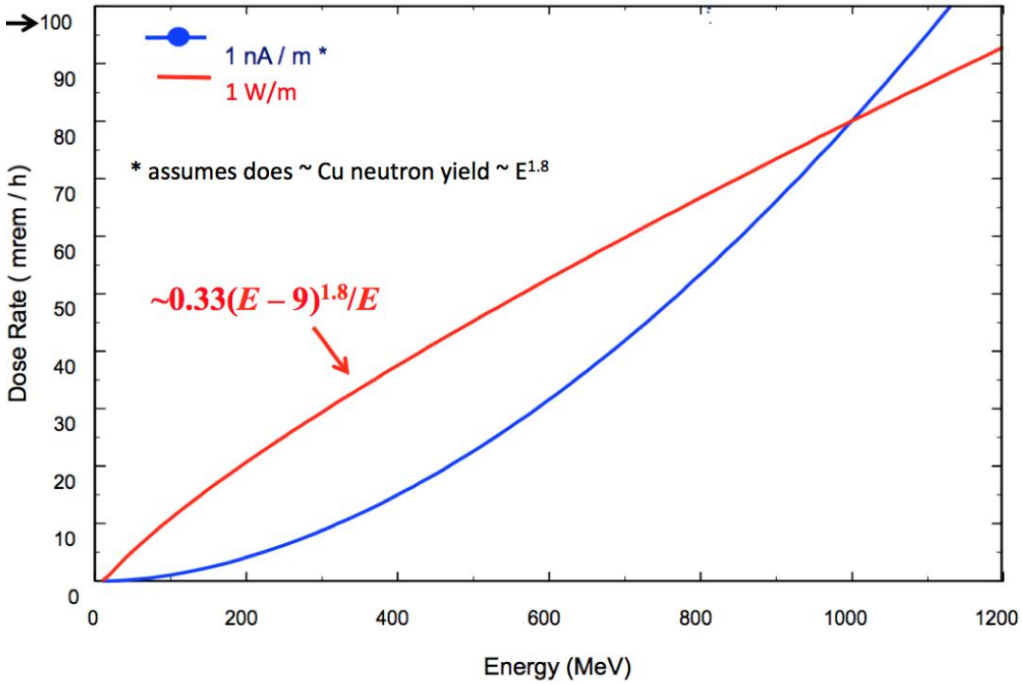


Рисунок 1.7.1 – Расчётная оценка мощности дозы наведенной радиоактивности от потерь пучка протонов в меди на расстоянии 30 см после 4 часов выдержки

При этом потери пучка отрицательных ионов водорода сложнее контролировать, чем потери пучка протонов, из-за большего количества возможных каналов потерь (таблица 1.7.1).

Таблица 1.7.1 – Каналы возникновения потери пучков в линейных ускорителях H^- и H^+

Физический процесс, вызывающий потери пучка	**Возможность для пучка H^-**	**Возможность для пучка H^+**
Обдирка на остаточном газе	∨	×
Захват и ускорение H^+	∨	×
Внутрипучковая обдирка	∨	×
Магнитная обдирка	∨	×
Фотодиссоциация тепловым излучением	∨	×
Гало пучка	∨	∨
Переходные процессы в импульсных системах линака	∨	∨

Обдирка на остаточном газе критическим образом зависит от давления в ионопроводе и, являясь одним из основных каналов потерь пучка, может достигать ~25% всех потерь вдоль линака, при этом вероятность полной обдирки $H^- \rightarrow H^+$ составляет ~4% вероятности процесса нейтрализации $H^- \rightarrow H^0$. Типичная оценка линейной мощности потерь пучка H^- с током 1 мА, движущимся с энергией 100 МэВ в ионопроводе с остаточным давлением ~10^{-7} Торр при температуре 293 К, составляет 0.25 Вт/м.

Протоны, оставшиеся в процессе полной обдирки, могут быть захвачены в режим ускорения и стать источником наведенной радиоактивности в совершенно непредсказуемых местах. Например, на выходе линака LANSCE регистрируют ускоренные до 800 МэВ протоны, образующиеся при ухудшении вакуума в низкоэнергетическом канале транспортировки из несгруппированного пучка H^- [118], в J-PARC дополнительный радиационный фон в канале вывода в синхротрон создается протонами, рождающимися на выходе RFQ в уже сгруппированном пучке [119], при этом в SNS данный эффект отсутствует, что связывают с переходом на разные чётности рабочих ВЧ-гармоник в высокоэнергетичной части линака:

J-PARC – 3я гармоника, SNS – 2я гармоника. Переход с основной гармоники на чётную предотвращает захват протонов в режим ускорения в следующей части линака H^-, в то время как переход на нечётную гармонику не препятствует этому процессу (Рисунок 1.7.2).

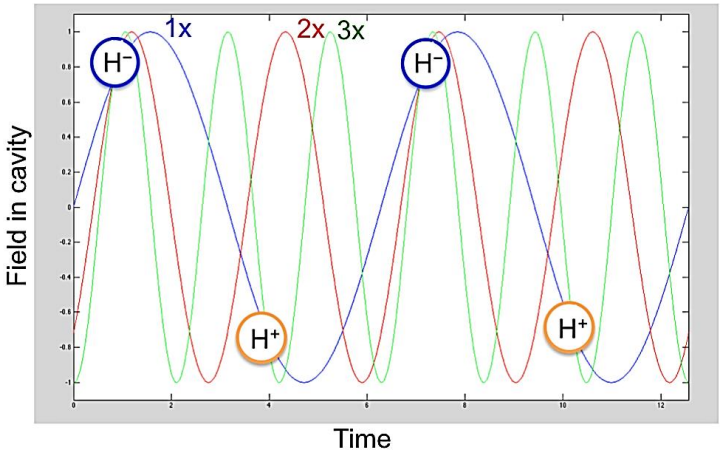


Рисунок 1.7.2 – Распределение гармоник электрического поля в резонаторе линака. Протонный пучок ускоряется при переходе ВЧ-частоты на 3ю гармонику

Внутрипучковая обдирка является основным каналом потерь в SNS и LANSCE и связана с отрывом слабосвязанного электрона и последующей потерей нейтрального атома. Эффект пропорционален квадрату плотности частиц в сгустке и сечению одноэлектронной обдирки, сильно зависящему от относительной скорости ионов в сгустке (Рисунок 1.7.3) [120].

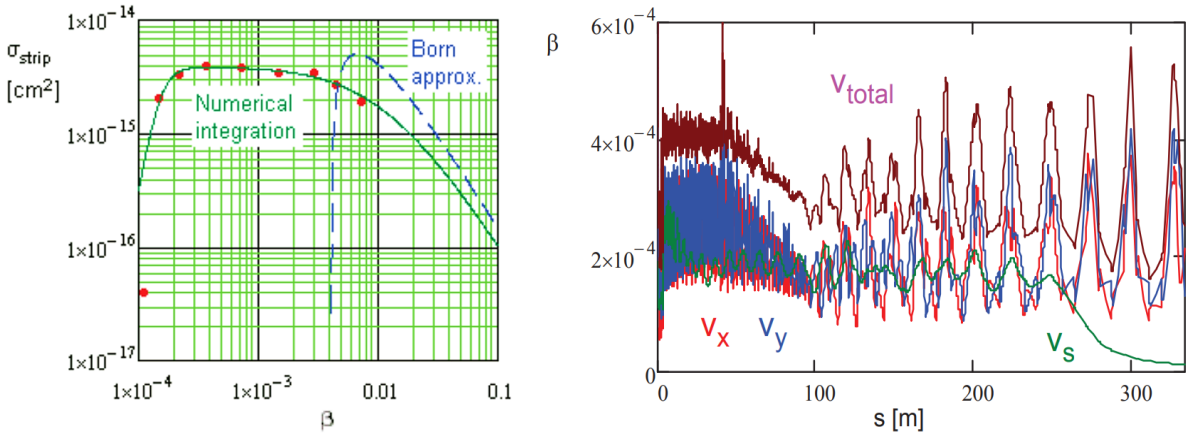


Рисунок 1.7.3 – Зависимость сечения внутрипучковой одноэлектронной обдирки от относительной скорости ионов в сгустке и значение этой скорости вдоль линака SNS

Для минимизации этих потерь в высокоэнергетической сверхпроводящей части линака SNS, где они изначально достигали величины ~0.13 Вт/м, пришлось увеличить поперечный размер пучка, уменьшив градиенты квадрупольных линз на 40% относительно расчетных значений, при которых в данной части ускорителя ожидаемые потери должны были оказаться нулевыми благодаря сверхвысокому вакууму и увеличенной апертуре. Эффекты магнитной обдирки (Рисунок 1.7.4) и фотодиссоциации пучка проявляются при релятивистских энергиях.

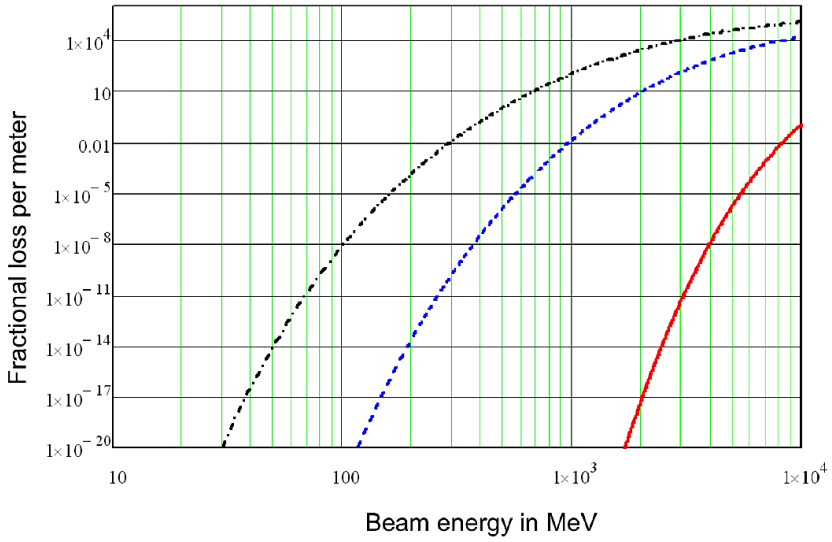


Рисунок 1.7.4 – Относительные потери пучка H^- из-за магнитной обдирки в разных магнитных полях: красная линия – 0.1 Тл, синяя линяя – 0.5 Тл, черная линия – 1 Тл

Задачей системы контроля и измерения потерь пучка является локализация места потерь вдоль ионопровода и момента времени потерь вдоль импульса тока пучка, поэтому датчики потерь должны обладать следующими базовыми свойствами:

- пропорциональность сигнала величине потерь пучка для удобства работы оператора ускорителя во время настройки и эксплуатации,
- большой динамический диапазон для измерений как малых потерь во время штатной работы ускорителя, так и больших потерь при настройке пучка или в аварийных ситуациях,
- высокое временнóе разрешение для контроля момента времени возникновения потерь в масштабах макроимпульса или даже микросгустка тока пучка.

Как правило, датчики потерь устанавливаются рядом с ионопроводом и регистрируют либо первичные «потерянные» частицы пучка, либо потоки вторичных частиц (гамма-кванты, нейтроны), образующиеся при взаимодействии первичного пучка со стенками ионопровода и элементами ускорительно-фокусирующего канала. К основным типам датчиков потерь пучка на ионных линаках можно отнести:

- фотоумножители, электронные умножители,
- фотодиоды, PIN-диоды, алмазные детекторы,
- жидкие и твердотельные сцинтилляторы,
- газовые ионизационные и пропорциональные камеры,
- детекторы на основе излучения Вавилова-Черенкова, оптоволокно.

Пример стенда с различными датчиками потерь и типичные результаты измерений этими датчиками для проверки линейности сигнала и относительной чувствительности разных типов детекторов показаны на рисунке 1.7.5 [45].

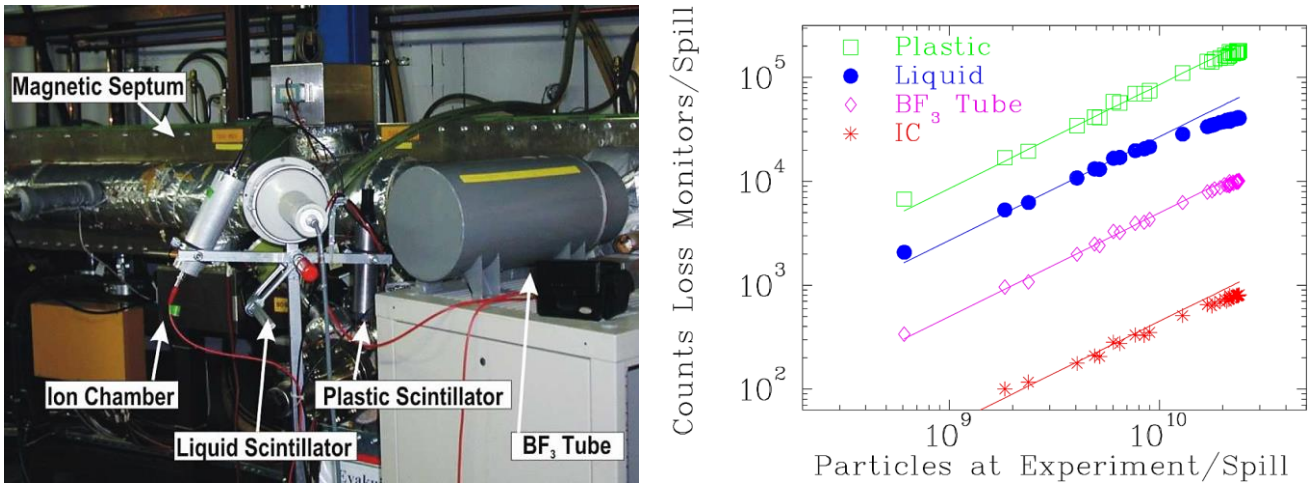


Рисунок 1.7.5 – Стенд для тестирования датчиков потерь пучка ионов в GSI
Слева направо: ионизационная камера, жидкий и пластиковый сцинтилляторы, нейтронный газонаполненный детектор на основе трифторида бора.

Кроме того, возможна реализация неразрушающей системы быстрого аварийного контроля потерь пучка на основе индукционных датчиков тока, подробная конфигурация которой изложена в 4й главе данной диссертации.

Ионизационная камера

Основными датчиками потерь пучка в «высокоэнергетичной» части (> 50÷100 МэВ) современного линака ионов являются ионизационные камеры (ИК), регистрирующие ионизационные потери частиц пучка, вышедших за пределы ионопровода и прошедших через рабочий объем камеры. Выбор, в основном, определяется конструкцией – простой и надежной в долгосрочной эксплуатации на протяжении ~ 10÷20 лет, а также высокой радиационной стойкостью, которая может достигать ~ 10^7 Гр.

Физические принципы работы и типичные характеристики

В простейшем варианте ИК состоит из катода и анода, находящихся в газовом объеме (азот, сухой воздух, аргон, углекислый газ), в котором при прохождении заряженной частицы рождаются электрон-ионные пары, начинающие в электрическом поле дрейфовое движение к электроду соответствующей полярности (Рисунок 1.7.6) [121]. Присутствие электроотрицательных газов, например паров воды или кислорода, в такой камере должно быть минимизировано во избежание рекомбинации дрейфующих электронов. В результате, ток, стекающий через рабочее сопротивление R, создает сигнал, собираемый стандартным предусилителем с преобразованием ток-напряжение или ток-частота.

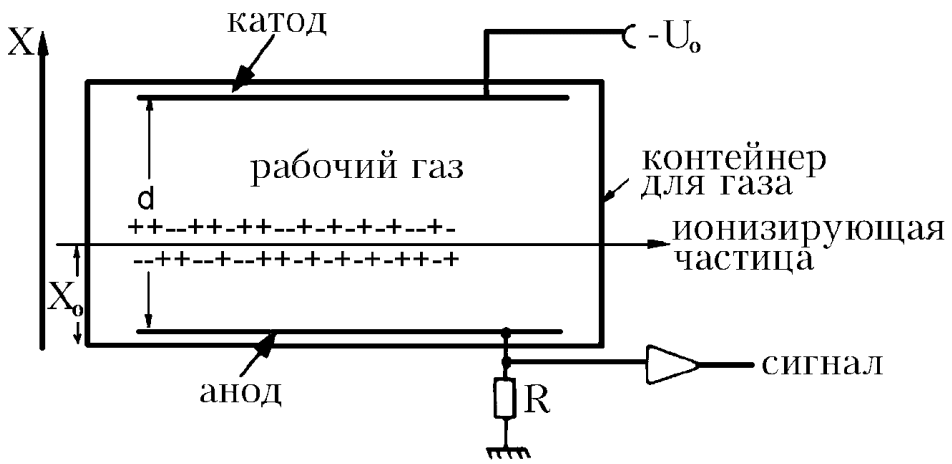


Рисунок 1.7.6 – Схема работы ионизационной камеры

Можно выделить следующие основные характеристики ионизационной камеры:

1. Нечувствительность к нейтронам и слабая чувствительность к γ-квантам.
2. Стабильность ионизационного сигнала при колебаниях напряжения.
3. Высокая радиационная стойкость.
4. Высокая линейность результатов измерений.
5. Прямое соответствие величины сигнала поглощенной дозе в Греях.
6. Типичный временно́й отклик ~1 мс.
7. Типичная рабочая напряженность электрического поля ~1 кВ/см.

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Существует большое количество различных конструкций ИК, реализованных на практике, однако по абсолютному числу изготовленных устройств лидирует конструкция (Рисунок 1.7.7), разработанная и доведенная до уровня стандартного, коммерчески доступного продукта в Институте физики высоких энергий им. А. А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт» [122].

Рисунок 1.7.7 – Стандартная ионизационная камера ИФВЭ для линака ESS (вверху: внутренняя конструкция, внизу: внешний металлический корпус)

Цилиндрическая ионизационная камера ИФВЭ представляет из себя герметичный сварной цилиндр из нержавеющей стали длиной ~ 50 см, заполненный сухим азотом при давлении 1.1 атмосферы. Внутри цилиндра на стержнях, закрепленных на керамических изоляторах, размещена сборка из

40÷60 алюминиевых дисков, образующих электродную систему, на которую, через герметичные вводы, подается разность потенциалов 1.5 кВ. В специальном цилиндрическом корпусе, закрепленном на ионизационной камере, размещены внешние электрические разъемы, высокоомный резистор 10 МОм, 1 Вт и высоковольтный конденсатор 0.47 мкФ, 2 кВ.

Около 4000 таких ИК установлены и успешно используются на различных ускорителях CERN (Рисунок 1.7.8), включая 24 камеры на LINAC4. Около 300 камер изготовлены для ESS [123], десятки аналогичных ИК используются на ускорителях GSI, ИЯИ РАН, ИФВЭ.

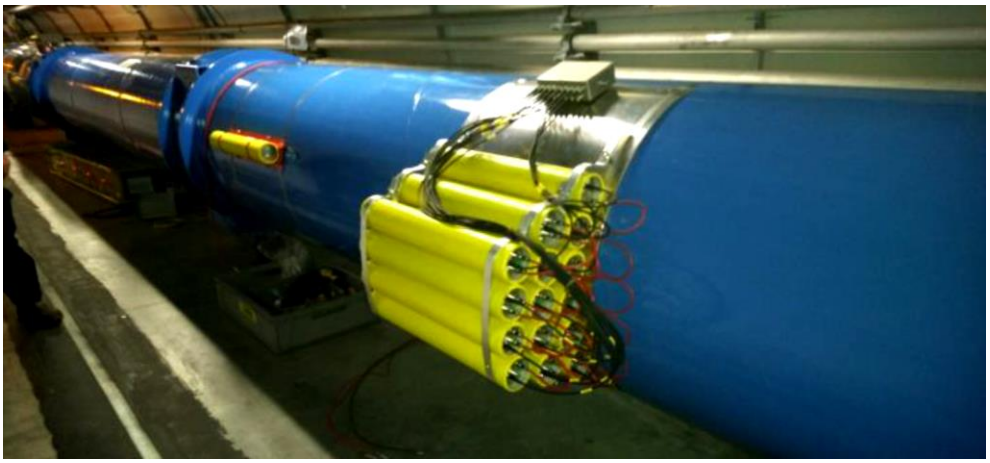


Рисунок 1.7.8 – ИК ИФВЭ, установленные на LHC CERN

Таким образом, для организации системы контроля потерь пучка на участках с энергией > 50 МэВ представляется целесообразным использовать в качестве основных датчиков потерь стандартные ионизационные камеры производства ИФВЭ в цилиндрической или плоской геометрии (Рисунок 1.7.9) [124].

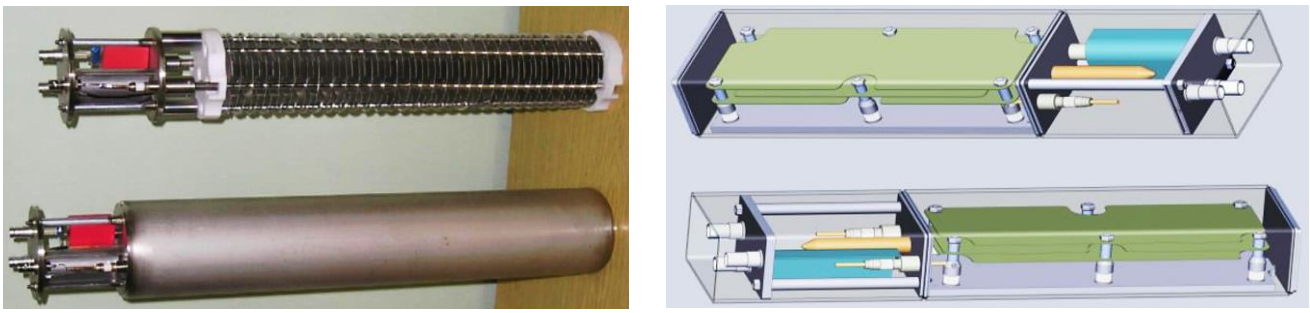


Рисунок 1.7.9 – Цилиндрическая и плоская ионизационные камеры ИФВЭ

Нейтронный газонаполненный детектор

При энергиях < 50 МэВ, в зависимости от геометрии ускоряюще-фокусирующего канала, чувствительности ИК будет недостаточно для проведения статистически достоверных импульсных измерений, а начиная с некой пороговой энергии, за пределами ионопровода в принципе можно будет зарегистрировать только нейтроны и гамма-кванты, причем в случае пучков многозарядных ионов эта энергия может быть больше номинальной энергии ускорителя.

Регистрация гамма-квантов осложняется сильным фоном рентгеновского излучения от ВЧ-резонаторов линака, который может быть даже больше, чем сигнал истинных потерь. Для учета такого паразитного фона в SNS ORNL каждые 10 с проходит «пустой» импульс синхронизации, запускающий только ВЧ-резонаторы без включения пучка: сигнал, зарегистрированный датчиками потерь в этом импульсе, запоминается и программным образом вычитается из сигналов потерь в обычных импульсах пучка (Рисунок 1.7.10) [125].

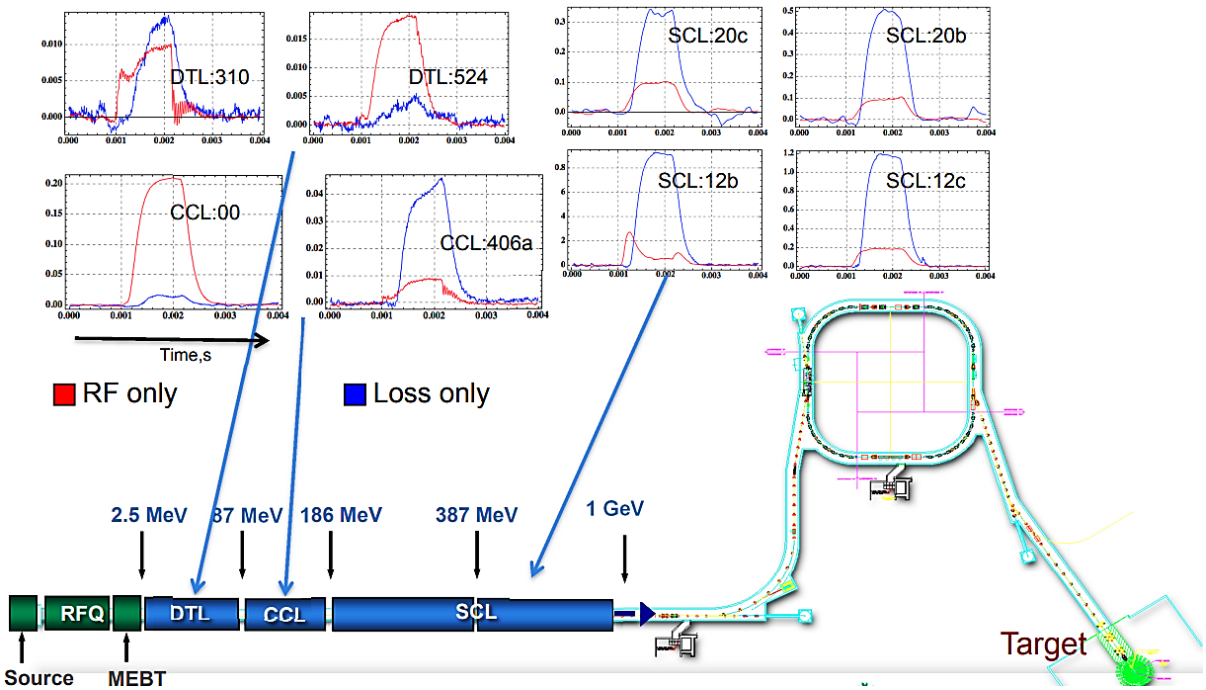


Рисунок 1.7.10 – Импульсные сигналы датчиков потерь пучка вдоль линака SNS. Красным цветом выделены сигналы от рентгеновского излучения ВЧ резонаторов, синим – сигнал «истинных» потерь пучка после вычитания фона ВЧ

Несмотря на очевидную результативность такого подхода он не может использоваться для оперативного контроля, так как быстрая аварийная защита ускорителя работает в таких условиях неправильно. В связи с этим, в низкоэнергетических частях линейных ускорителей H^- и H^+, а также в целом в ускорителях многозарядных ионов следует отдавать предпочтение нейтронным газонаполненным детекторам (НГД), которые при этом, по возможности, должны быть малочувствительны к гамма-квантам.

Физические принципы работы и типичные характеристики

Нейтронные датчики на основе пропорциональных газовых счётчиков, заполненных BF_3 или ^3He, нашли широкое применение на ионных линаках. Газонаполненная стеклянная цилиндрическая трубка окружена концентрическими слоями полиэтилена (Рисунок 1.7.11): внешний слой – для замедления нейтронов до тепловых энергий за счет взаимодействий с ядрами водорода в полиэтилене, внутренний слой – борированный, для увеличения угловой изотропии. Попадая в трубку, нейтроны вызывают реакцию $^{10}B + n \rightarrow {}^7Li + \alpha$ или $^3He + n \rightarrow {}^3H + {}^1H$ в зависимости от газового наполнения, в результате чего в объеме пропорциональной камеры развивается лавина, создающая регистрируемый сигнал. Типичная скорость счета обычно ограничена величиной $10^4 \div 10^5$ c^{-1}.

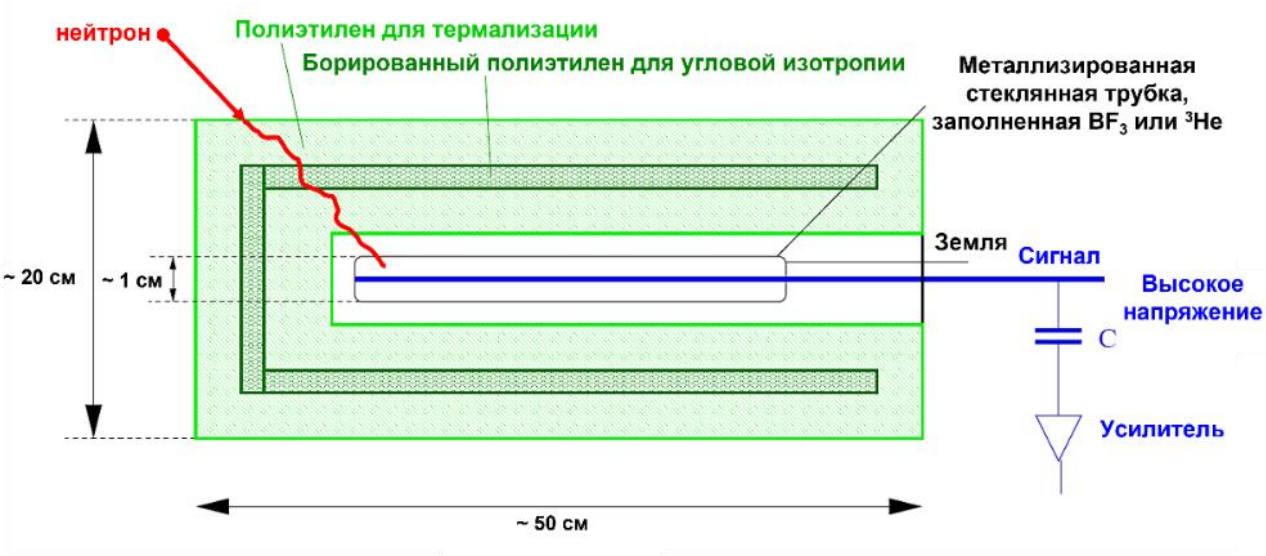


Рисунок 1.7.11 – Схема пропорционального газового счетчика нейтронов

Особенности практической реализации и примеры реальных устройств

Подобные детекторы обычно используются на атомных электростанциях (АЭС), поэтому рассчитаны на начальные энергии нейтронов до 14 МэВ, при которых они быстро термализуются в полиэтиленовом кожухе, и сечение реакций в рабочей камере достигает величины ~1 кбарн (Рисунок 1.7.12) [126], однако на практике нейтроны с энергиями несколько сотен МэВ также могут быть зарегистрированы.

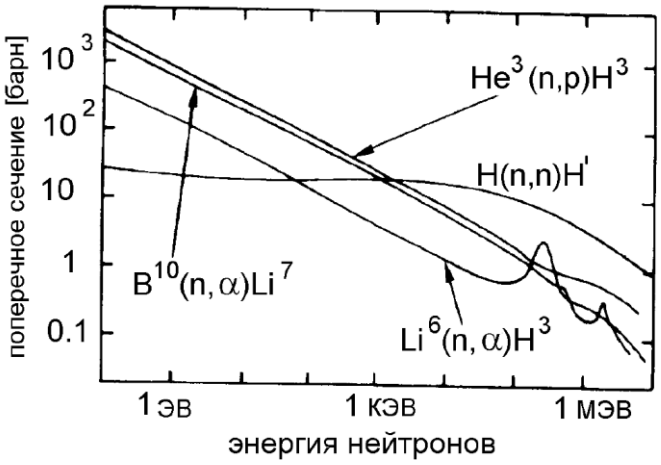


Рисунок 1.7.12 – Зависимость сечения реакций от энергии нейтронов

Для создания системы измерения потерь пучка на основе НГД могут быть использованы стандартные, сертифицированные и поверенные, коммерчески доступные блоки детектирования нейтронов для АЭС, например, гелиевые счетчики производства компании Атомтех в различных конфигурациях (Рисунок 1.7.13) [127].

Рисунок 1.7.13 – Блоки детектирования нейтронного излучения Атомтех

1.8 Выводы Главы 1

В Главе 1 сформулированы задачи и потребности в диагностике пучков в зависимости от типа, назначения и характеристик линейных ускорителей ионов, даны определения и типичные значения основных измеряемых параметров пучков, проведен анализ методов и средств диагностики и показан типичный выбор диагностических устройств, приведены описания их физических принципов работы и основных технических характеристик, особенности и примеры практической реализации, а также указаны опытно-аналитические обоснования их применимости для различных типов пучков, что в совокупности формирует согласованную физико-техническую концепцию построения систем базовой диагностики пучков для линейных резонансных ускорителей ионов с целью проведения следующих типов измерений:

1. Измерения тока: индукционный датчик тока и цилиндр Фарадея.
2. Разрушающие измерения поперечного профиля: двухпроволочный сканер, многопроволочный профилометр, люминесцентный экран.
3. Неразрушающие измерения поперечного профиля: ионизационный монитор поперечного сечения пучка, профилометр на основе свечения остаточного газа.
4. Измерения поперечного эмиттанса: электростатический, диафрагмированный, щелевой измерители эмиттанса.
5. Измерения продольной микроструктуры: измеритель формы сгустков.
6. Измерения положения и фазы: ёмкостные и полосковые датчики положения.
7. Измерения потерь: газовые ионизационные и пропорциональные камеры.

Представленная физико-техническая концепция была, в частности, использована для составления концепции системы диагностики пучка сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA [9, 11] (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Applications) – компактного источника нейтронов для фундаментальных исследований, промышленных приложений и образовательных задач, разрабатываемого на основе ускорителя с проектными характеристиками, указанными в Таблице 1.8.1.

Таблица 1.8.1 – Основные характеристики пучка протонов проекта DARIA

Характеристика	**Значение**
Энергия пучка на выходе источника (МэВ)	0.06
Энергия пучка на выходе RFQ (МэВ)	3.3
Энергия пучка на выходе ускорителя (МэВ)	13
Импульсный ток (мА)	до 100
Длительность импульса тока (мкс)	100
Частота следования импульсов (Гц)	до 100
Частота следования сгустков (МГц)	162.5

Одной из основных проблем для диагностики пучка в данном ускорителе является значительная импульсная и средняя мощность пучка в совокупности с относительно низкой энергией, что существенно ограничивает выбор возможных диагностических приборов и методов. В связи с этим, было рекомендовано построение системы диагностики на основе устройств, использующих неразрушающие способы измерений.

Индукционные датчики тока и полосковые датчики положения пучка для измерений положения, фазы и энергии пучка могут быть стационарно установлены вдоль ускорителя в количестве, достаточном для контроля прохождения пучка вдоль всей ускоряющей структуры.

На выходе ускорителя регистрация положения и поперечного сечения пучка может быть проведена с помощью ионизационного монитора поперечного сечения. Для измерений профиля пучка на входе и выходе RFQ (Radio-Frequency Quadrupole) наиболее предпочтительными устройствами являются проволочные сканеры, обеспечивающие прецизионные измерения, результаты которых могут быть использованы как для настроечных процедур, так и для моделирования динамики пучка в ускорителе с помощью различных транспортных кодов.

С учетом значительной импульсной и средней мощности пучка представляется нецелесообразным использование цилиндров Фарадея, совмещающих функции поглотителя и измерителя тока высокоинтенсивного пучка

в каналах транспортировки пучков средних и высоких энергий. Для корректных измерений в таких цилиндрах должно использоваться большое количество технологических решений, существенно увеличивающих их стоимость по сравнению с простой охлаждаемой ловушкой, рассчитанной на ту же мощность теплосъема. При этом охлаждаемый ЦФ может использоваться в качестве ловушки пучка номинальной интенсивности в канале транспортировки пучка низких энергий для предварительной настройки пучка перед ускорением в RFQ.

В случае конфигурации канала, не позволяющей разместить несколько отдельных диагностических устройств, предлагается разработка единого компактного диагностического бокса, включающего в себя ИДТ, охлаждаемый ЦФ и проволочный сканер.

Измеритель эмиттанса и измеритель формы сгустков часто изготавливаются в единичных экземплярах и передвигаются вдоль ускорителя в составе отдельного диагностического стенда на протяжении всего процесса настройки новых секций. В качестве ловушки пучка для такого стенда может использоваться стационарный охлаждаемый ЦФ, конструкция которого существенно упрощена благодаря размещению системы охлаждения вне вакуума ионопровода.

Схема предложенного размещения оборудования диагностики пучка вдоль линейного ускорителя протонов проекта DARIA приведена на рисунке 1.8.1.

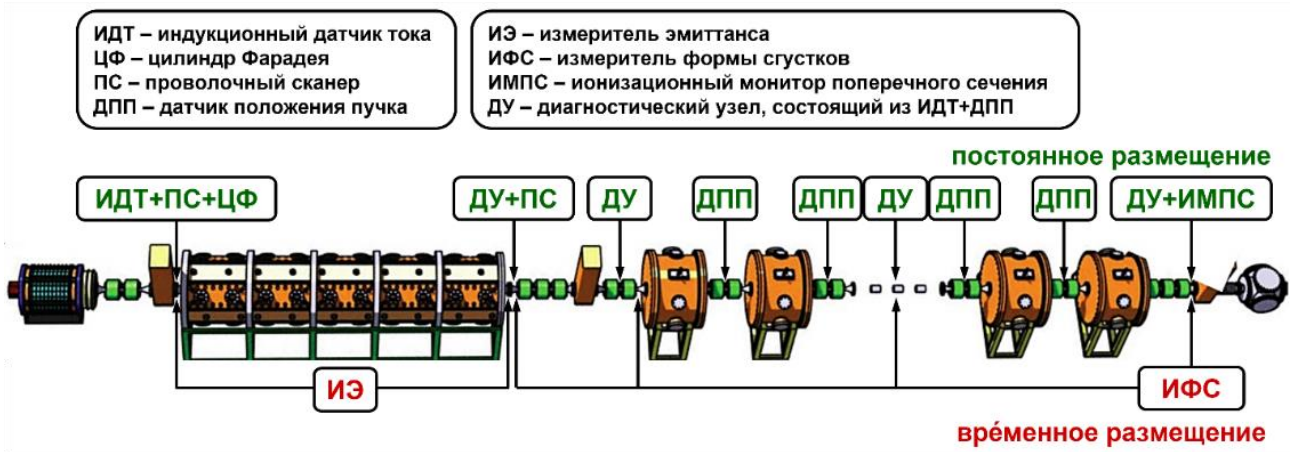


Рисунок 1.8.1 – Схема предложенного расположения оборудования системы диагностики пучка вдоль линейного ускорителя протонов проекта DARIA

ГЛАВА 2
РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И НАСТРОЙКА ОРИГИНАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ БАЗОВОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ

Работы по созданию устройств базовой диагностики пучков велись как для модернизации ускорительного комплекса на основе сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН, так и для выполнения обязательств в рамках соглашений с другими организациями. В том числе, в основе материалов главы лежат результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных в ИЯИ РАН по договорам с РФЯЦ-ВНИИЭФ, НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ «МИФИ», ОИЯИ, а также с зарубежными ускорительными центрами CERN (Швейцария), FAIR-GSI (Германия), ESS (Швеция), MYRRHA (Бельгия), FRIB MSU (США) на разработку, изготовление и поставку систем и отдельных устройств диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, действующих или сооружаемых в этих организациях.

Представленные в главе оригинальные конфигурации оборудования диагностики ионных пучков предназначены для широкого круга ускорителей и в совокупности фактически перекрывают весь диапазон параметров пучков в существующих и проектируемых линейных ускорителях ионов по типу частиц (от протонов и отрицательных ионов водорода до многозарядных тяжелых ионов), энергиям (от низкоэнергетических каналов транспортировки с энергиями пучка десятки кэВ до высокоэнергетичных участков на выходе современных ускорителей с энергиями ~ 1 ГэВ) и интенсивности, позволяя проводить необходимые диагностические измерения и на сильноточных пучках для нейтронных источников, комплексов для наработки медицинских изотопов или протонной флэш-терапии, и на пучках низкой интенсивности, например, для конвенциональной протонной терапии или стендов облучения для исследований радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры.

2.1 *Измерители тока пучка*

Индукционные датчики тока

Разработка и изготовление ИДТ активного типа выполнялись на основе ферритовых сердечников с магнитным экранированием (Рисунок 2.1.1), размещаемых как в индивидуальном вакуумном корпусе, так и в боксах, содержащих другое диагностическое оборудование (Рисунок 2.1.2). ИДТ комплектуются предусилительной электроникой и ячейками управления собственного производства.

Рисунок 2.1.1 – Сечение трехмерной модели ИДТ ИЯИ РАН и фотография внутреннего магнитного экрана с размещенным внутри ферритовым сердечником

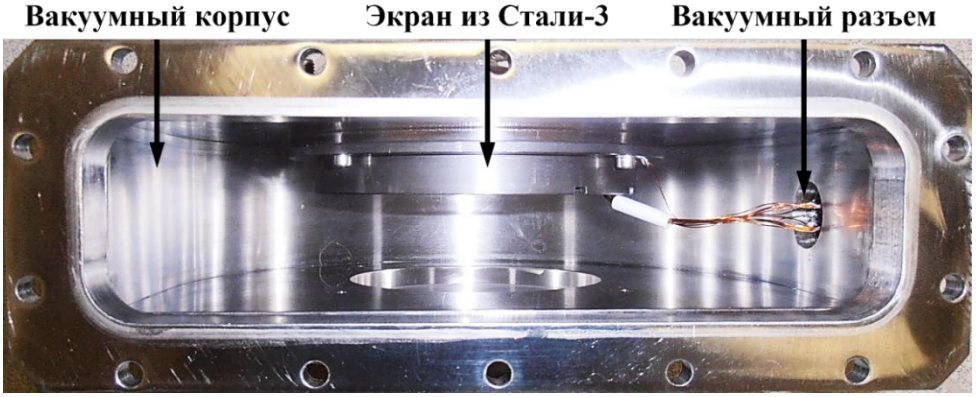


Рисунок 2.1.2 – ИДТ, встроенный в диагностический бокс для ЛУ-20 ОИЯИ

Конструктивные особенности

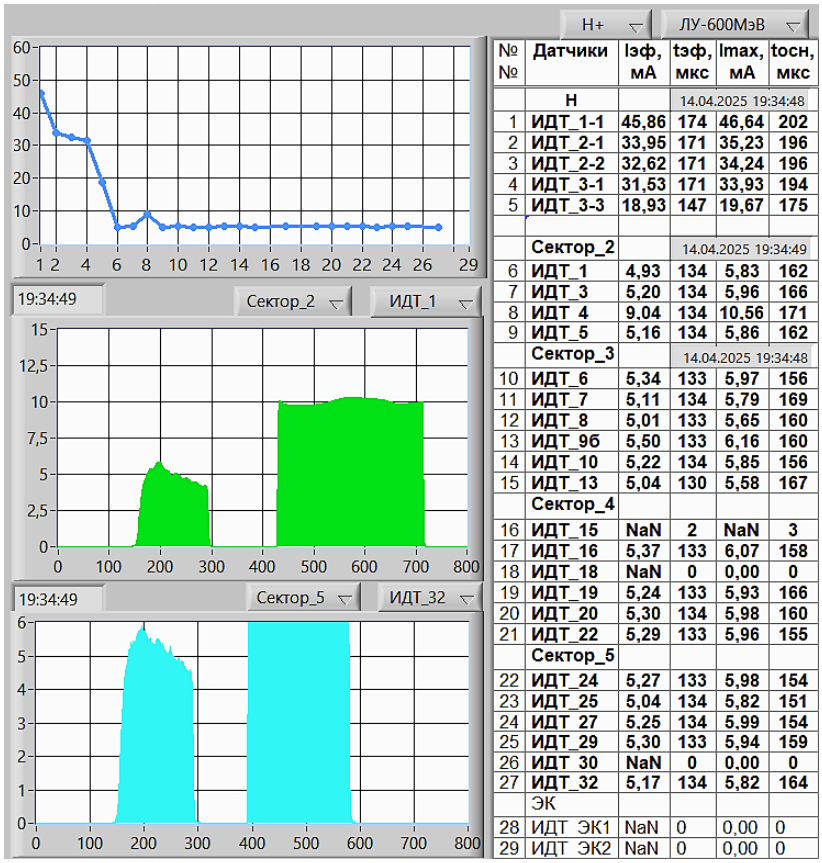
Обмотка сердечника выполнена из медного провода в радиационно стойкой и вакуумно-совместимой полиимидной изоляции. С целью абсолютной самокалибровки датчика в конструкции ИДТ предусмотрен дополнительный одиночный виток для подачи калибровочного тока известной величины от отдельного источника тока, размещенного в предусилительной электронике.

В качестве сердечников использовались тороиды из MnZn-ферритов производства фирмы Cosmo Ferrites (Индия) с начальной магнитной проницаемостью при комнатной температуре до $\sim (1\cdot10^4 \pm 25\%)$ без диэлектрического покрытия с целью снижения паразитного газовыделения.

Выбор ферритового сердечника объясняется существенным снижением стоимости итоговой сборки ИДТ благодаря отказу от дорогостоящих ленточных сердечников из аморфных или нанокристаллических сплавов и металлокерамической вставки, необходимой для их использования в условиях высокого вакуума с остаточным давлением $< 10^{-7}$ мбар.

Возможность эксплуатации ферритовых колец в вакууме такого уровня подтверждается многолетним опытом ИЯИ РАН, а также опытом других ускорительных центров, например, GSI (Германия), CERN (Швейцария), J-PARC (Япония) и др., где протяженные ферритовые сердечники импульсных магнитов-кикеров с большой площадью поверхности расположены в сверхвысоком вакууме ионопровода [128]. Типичный уровень газовыделения изостатически спрессованных ферритов при комнатной температуре без предварительной термической дегазации поверхности составляет $10^{-11}\div10^{-10}$ мбар·л/(с·см^2).

В частности, на ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН для диагностики токовых характеристик пучка установлено и успешно эксплуатируется в условиях высокого вакуума ($\sim10^{-7}$ мбар) несколько десятков индукционных датчиков тока на основе ферритовых сердечников, которые позволяют контролировать прохождение пучка вдоль ускорителя, показывая амплитуду и длительность импульсов тока пучка (Рисунок 2.1.3).



№ №	Датчики	Iэф, мА	tэф, мкс	Imax, мА	tосн, мкс
	H		14.04.2025 19:34:48		
1	ИДТ_1-1	45,86	174	46,64	202
2	ИДТ_2-1	33,95	171	35,23	196
3	ИДТ_2-2	32,62	171	34,24	196
4	ИДТ_3-1	31,53	171	33,93	194
5	ИДТ_3-3	18,93	147	19,67	175
	Сектор_2		14.04.2025 19:34:49		
6	ИДТ_1	4,93	134	5,83	162
7	ИДТ_3	5,20	134	5,96	166
8	ИДТ_4	9,04	134	10,56	171
9	ИДТ_5	5,16	134	5,86	162
	Сектор_3		14.04.2025 19:34:48		
10	ИДТ_6	5,34	133	5,97	156
11	ИДТ_7	5,11	134	5,79	169
12	ИДТ_8	5,01	133	5,65	160
13	ИДТ_9б	5,50	133	6,16	160
14	ИДТ_10	5,22	134	5,85	156
15	ИДТ_13	5,04	130	5,58	167
	Сектор_4				
16	ИДТ_15	NaN	2	NaN	3
17	ИДТ_16	5,37	133	6,07	158
18	ИДТ_18	NaN	0	0,00	0
19	ИДТ_19	5,24	133	5,93	166
20	ИДТ_20	5,30	134	5,98	160
21	ИДТ_22	5,29	133	5,96	155
	Сектор_5				
22	ИДТ_24	5,27	133	5,98	154
23	ИДТ_25	5,04	134	5,82	151
24	ИДТ_27	5,25	134	5,99	154
25	ИДТ_29	5,30	133	5,94	159
26	ИДТ_30	NaN	0	0,00	0
27	ИДТ_32	5,17	134	5,82	164
	ЭК				
28	ИДТ_ЭК1	NaN	0	0,00	0
29	ИДТ_ЭК2	NaN	0	0,00	0

Рисунок 2.1.3 – Рабочее окно системы измерений тока пучка вдоль ЛУ ИЯИ РАН

В связи с высоким возможным уровнем статических и низкочастотных магнитных полей от различных систем, включая импульсные квадруполи, необходимо использование многослойной защиты. Внутренний экран сердечника изготавливался в виде корпуса из ферритной нержавеющей стали-430 ($\mu \sim 1 \cdot 10^3$, $B_{max} \sim 1.5$ Тл, $\sigma \sim 1.7$ МСм/м) с симметричной кольцевой щелью. Внешний экран выполнялся из листов стали-430, оклеенных изнутри фольгой из аморфного сплава кобальта и железа ($\mu \sim 10^4 \div 4 \cdot 10^5$, $B_{max} \sim 1.5$ Тл, $\sigma \sim 2$ МСм/м) толщиной ~50÷100 мкм.

Низкочастотные магнитные поля ($f < 1$ кГц) плохо экранируются немагнитными материалами, т. к. наведенные вихревые токи, возникающие даже в материалах с высокой проводимостью (медь, алюминий), крайне малы на этих частотах, а толщина скин-слоя составляет несколько миллиметров.

В связи с этим, эффект экранирования в данном диапазоне частот одинаков по порядку величины для статических и переменных полей, и в основном определяется магнитными свойствами, толщиной и геометрией экрана.

На рисунке 2.1.4 показана типичная трехмерная модель ИДТ для ЛУ сооружаемого ускорительного комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ в сборе с кожухом внешней магнитной защиты, указанием внутренней конфигурации и характерных размеров. Вакуумный корпус датчика изготавливается из двух переходников на основе conflat-фланцев CF150 – CF63. Общая масса конструкции ~ 11 кг.

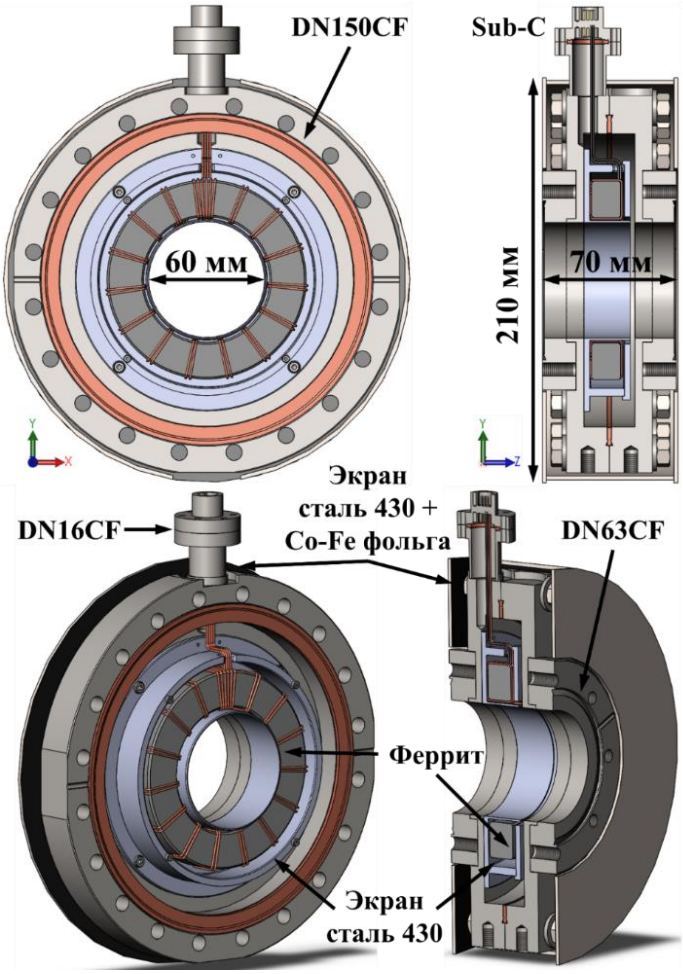
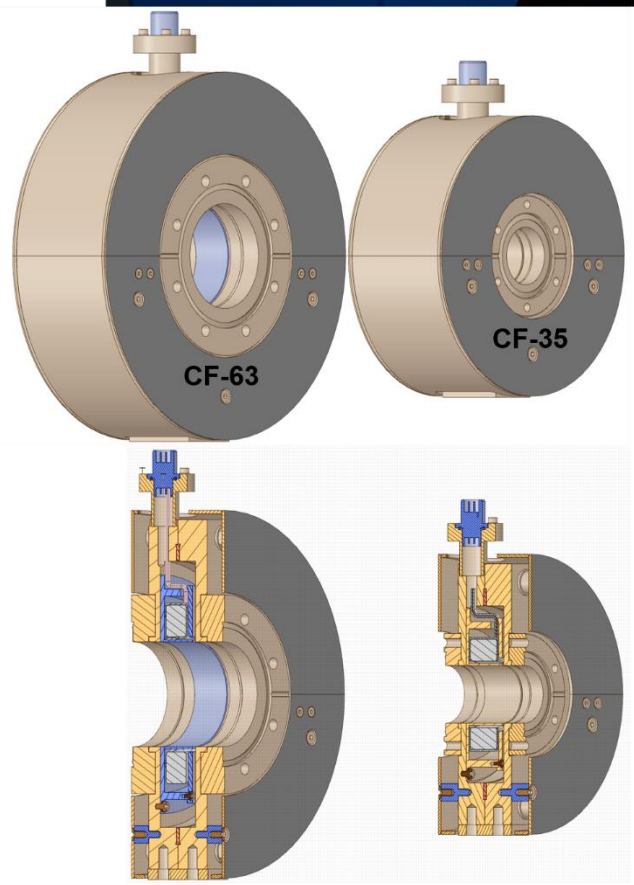


Рисунок 2.1.4 – Трехмерная модель ИДТ с внешней магнитной защитой

Разработанные в ходе выполнения работ трехмерные модели ИДТ, масштабированные для двух значений апертуры, наиболее типичных для линейных ускорителей ионов: 60 мм на основе присоединительных фланцев CF-63 и 33 мм на основе присоединительных фланцев CF-35 – показаны на рисунке 2.1.5 вместе с фотографиями изготовленных образцов ИДТ с апертурой 60 мм. В качестве вакуумного многоконтактного разъема для передачи токовых сигналов использован отечественный герметичный разъем 2РМГ14Б4Ш1Е2.



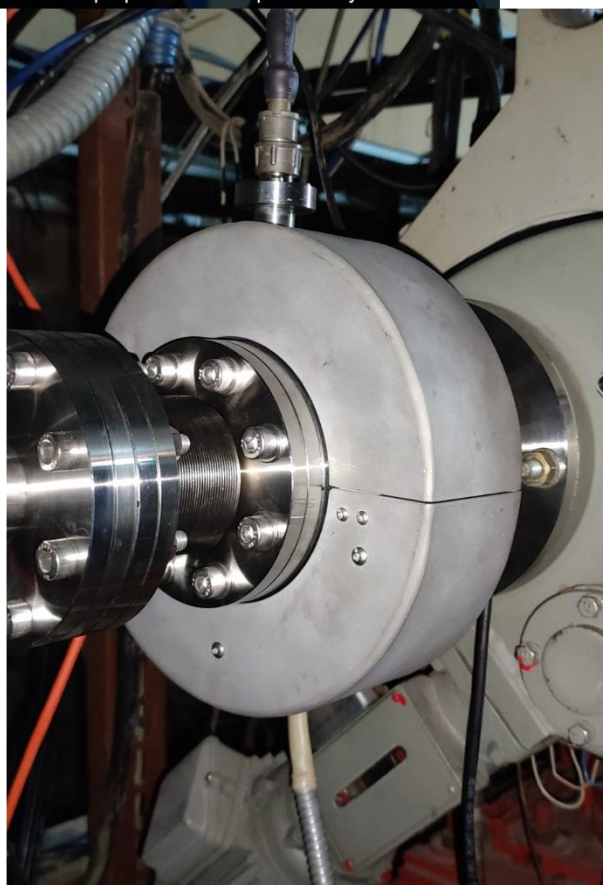


Рисунок 2.1.5 – Фотографии изготовленных ИДТ с апертурой 60 мм в руках автора и на ускорителе ИЯИ РАН, а также разработанные трехмерные модели ИДТ с апертурами 60 мм (CF-63) и 33 мм (CF-35)

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик

Для оценки эффективности предлагаемой многокомпонентной магнитной защиты было проведено трехмерное моделирование статических и переменных магнитных полей. Было рассмотрено три случая:

1. Синусоидальное дипольное поле вдоль оси Y: f = 50 Гц, B = 0.1 мТл.
2. Импульсное краевое поле квадрупольной линзы с градиентом 0.1 Тл/м в апертуре ИДТ с временем нарастания 1 мс.
3. Постоянное краевое поле дипольного магнита: B = 50 мТл.

На рисунке 2.1.6 представлены результаты моделирования 1го случая, поперечной помехи 50 Гц, в сравнении с полем тока пучка.

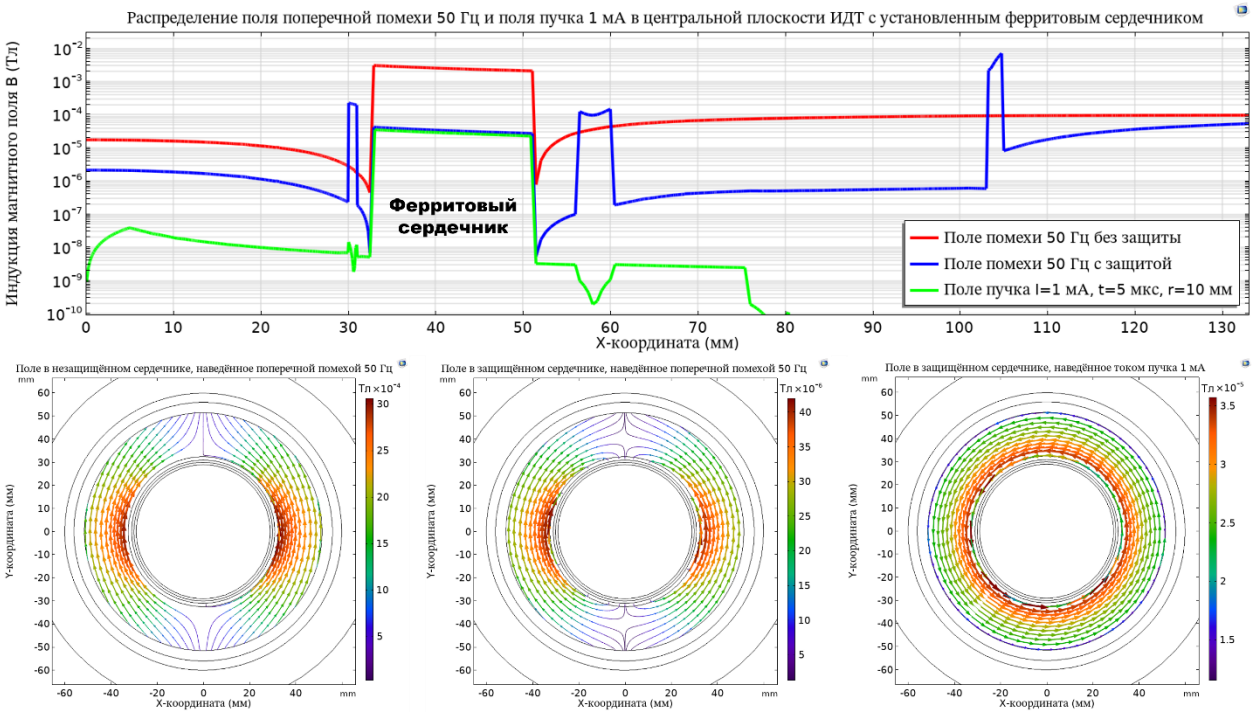


Рисунок 2.1.6 – Рассчитанное в COMSOL Multiphysics влияние переменных магнитных полей с частотой 50 Гц на конфигурацию ИДТ

Конечная величина суммарного потока через кольцевую обмотку для помехи 50 Гц близка к нулю благодаря симметрии витков относительно линий наведенного в сердечнике поля и определяется степенью симметричности обмотки и однородностью сердечника.

На рисунках 2.1.7 и 2.1.8 показаны расчеты для 2го и 3го случаев соответственно.

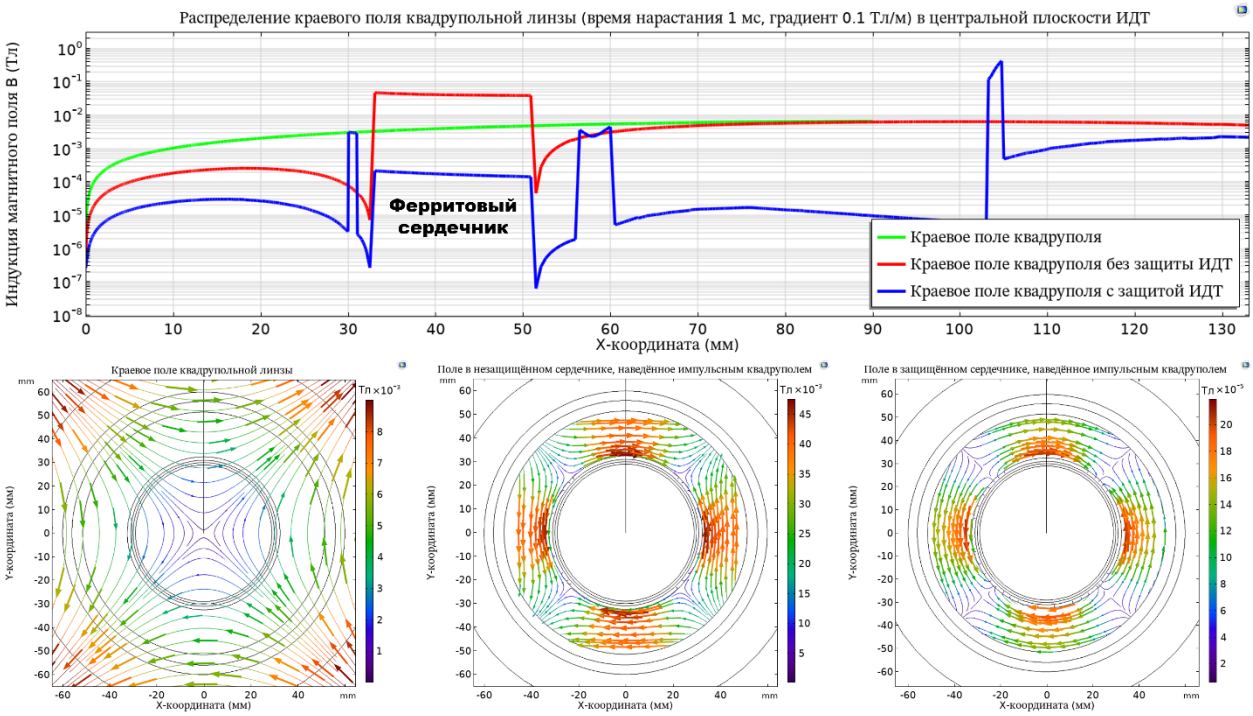


Рисунок 2.1.7 – Рассчитанное в COMSOL Multiphysics влияние краевого импульсного поля квадрупольной линзы на ИДТ

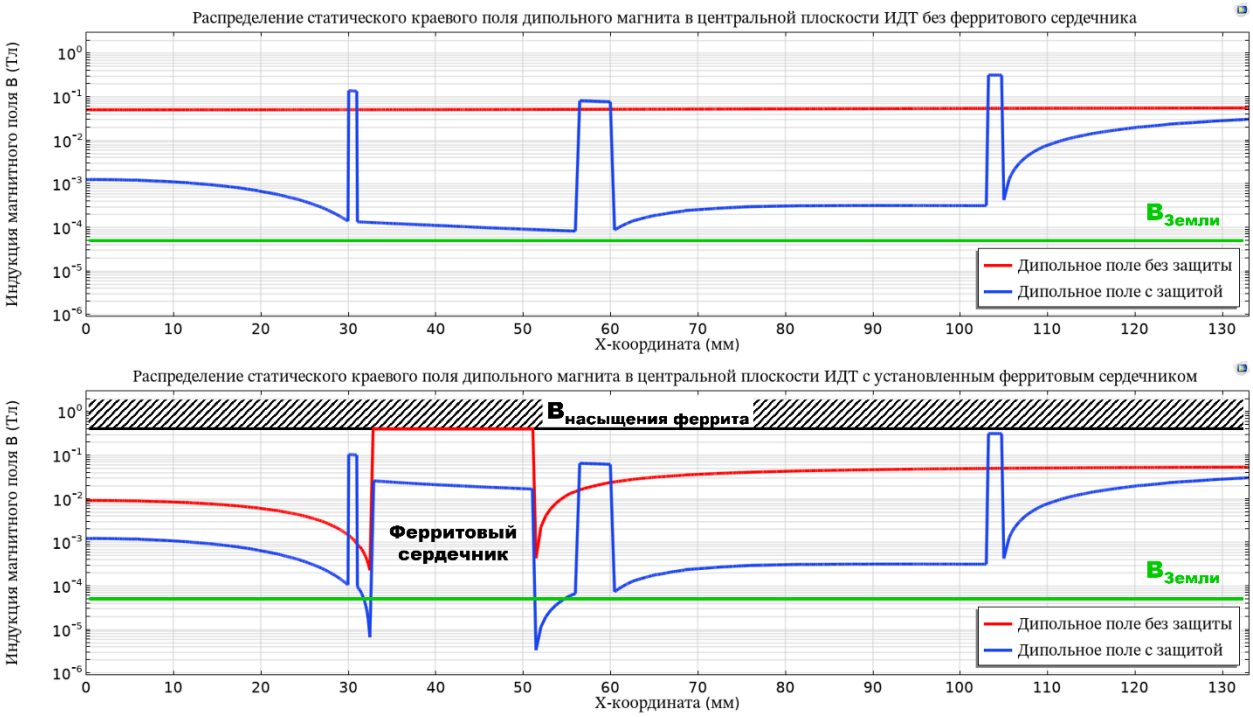


Рисунок 2.1.8 – Рассчитанное в COMSOL Multiphysics влияние краевого статического поля дипольного магнита на ИДТ

Аналогично 50 Гц помехе суммарный поток в сердечнике будет стремиться к нулю благодаря симметрии кольцевой обмотки относительно квадрупольного наведенного поля. Насыщения сердечника при этом не происходит.

Таким образом, предлагаемые компоненты внутренней и внешней магнитной защиты суммарно снижают индукцию наведенного в ферритовом сердечнике ИДТ поля в среднем в $100 \div 200$ раз (> 40 дБ) для различных конфигураций как статических, так и низкочастотных полей, и использование предлагаемой конфигурации защитных экранов, в совокупности с дифференциальным способом съема сигнала обеспечивает достаточную защиту от ожидаемых краевых полей и помех различной природы.

Базовую чувствительность ИДТ, например для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ с обмоткой из $2{\cdot}N = 2{\cdot}6$ витков, при R_f ~1 кОм в трансимпедансной схеме можно оценить как:

$$S \cong \frac{R_f}{N} \cong 166 \left[\frac{\text{В}}{\text{А}}\right]. \qquad (2.1.1)$$

Использование предусилительной электроники позволяет увеличить базовую чувствительность до максимального значения S_{max}~10^4 [В/А], время спада при этом будет равно $t_c \approx 400$ мкс, т. е. спад вершины составит ~0.2 %/мкс, а время нарастания $t_н \approx 0.2$ мкс при длине кабельной трассы от ИДТ до предварительного усилителя менее 5 м и использовании экранированного многопарного кабеля с сечением проводников > 0.25 мм^2.

Параметры электроники

Регистрация измеряемого наведенного тока и подача калибровочного тока осуществляется дифференциальным способом через экранированную витую пару с помощью блока трансимпедансного предварительного усилителя (УПР) собственного производства, который состоит из усилительного тракта, генератора калибровочного импульса с дискретными уровнями 25 мА, 2.5 мА, 250 мкА, 25мкА и релейной схемы переключения коэффициентов усиления. Трансимпедансная схема усилителя обеспечивает низкое входное сопротивление, что существенно

уменьшает спад вершины импульса. При этом ИДТ вместе с соединительным кабелем оказывается включен в обратную связь входного каскада УПР, и за счет применения операционных усилителей с токовой обратной связью коэффициент усиления влияет на полосу пропускания незначительно. Релейная схема обеспечивает одновременное переключение шкал усилителя и генератора калибровочного импульса.

Конструктивно УПР собирается в стандартном алюминиевом корпусе РЭА и имеет два соединительных многоконтактных разъема типа 2РМ: один – для подключения ИДТ, второй – для питания УПР, передачи аналогового сигнала, приема цифровых сигналов калибровки в стандарте RS-422, а также для управления реле. Сигналы ИДТ и калибровки принимаются и передаются дифференциальным образом по витой паре, поэтому усилитель сможет надежно работать на удалении до нескольких сотен метров от пультовой. Питание УПР: ±24 В, ток потребления < 200 мА. Диапазон аналоговых сигналов: ±2 В.

Лабораторные испытания ИДТ

Пример лабораторных испытаний ИДТ приведен для конфигурации датчика, разработанного в рамках исследований по программе НЦФМ. В качестве сердечника в нём использован стандартный тороид типоразмера T8515 (внешний диаметр 85.0±1.5 мм, внутренний диаметр 62.0±1.5 мм, толщина 15.0±1.0 мм) из MnZn-феррита CF-199 производства фирмы Cosmo Ferrites (Индия) с начальной магнитной проницаемостью при комнатной температуре ~ (9000 ± 20%), что при эффективной длине магнитной линии 227.1 мм и эффективной площади поперечного сечения 171.1 мм позволило достичь величины одновитковой индуктивности ~ 7 мкГн. Сигнальная обмотка имеет 24 витка, навитых проводом ПНЭТ-имид с медной никелированной жилой номинальным диаметром 0.71 мм в вакуум-совместимой, радиационно стойкой полиимидной изоляции (Рисунок 2.1.9).

Для предотвращения эффекта «виртуальной течи» во внутренних глухих крепёжных отверстиях использованы вентилируемые болты и разрезные шайбы.

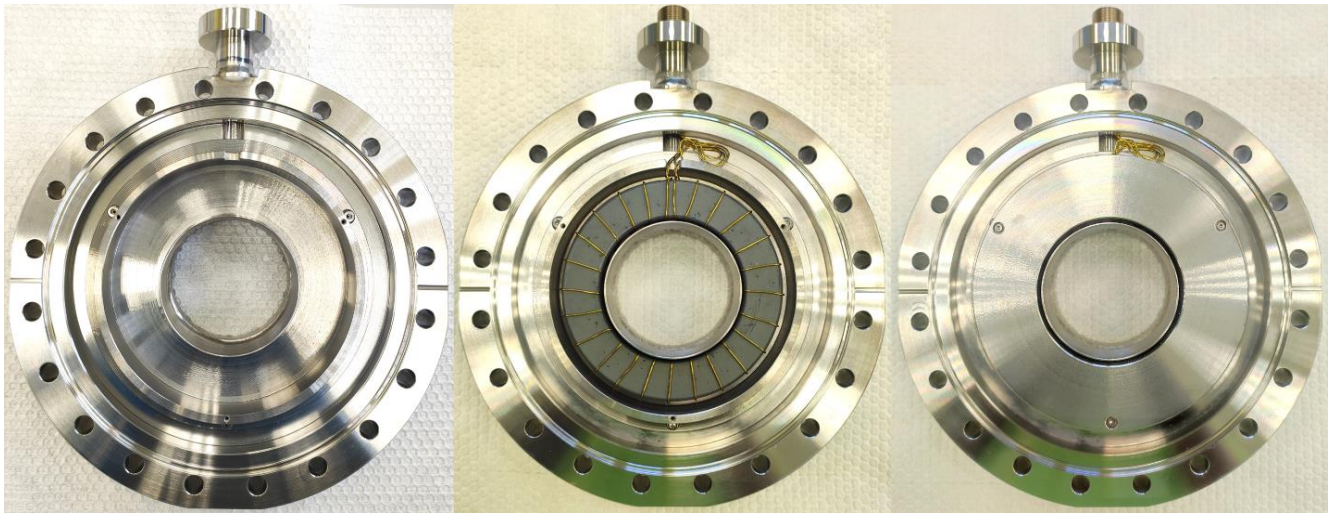


Рисунок 2.1.9 – Этапы сборки ИДТ: установка чашки внутреннего магнитного экрана, установка ферритового сердечника с обмотками, установка крышки внутреннего магнитного экрана с кольцевой щелью

Вакуумные испытания ИДТ проводились на специализированном вакуумном стенде на основе турбомолекулярного откачного поста, магниторазрядного насоса и гелиевого течеискателя (Рисунок 2.1.10). Собственное остаточное давление в объёме стенда после 24 часов непрерывной откачки с уровня атмосферного давления при нормальных условиях достигает величины ~ $5 \cdot 10^{-8}$ Торр.

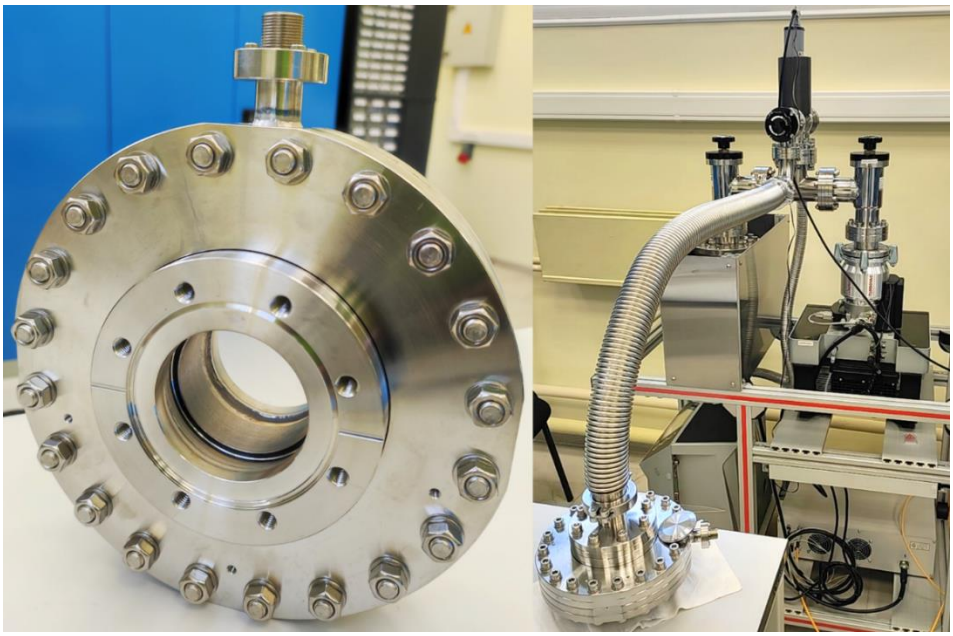


Рисунок 2.1.10 – Вакуумные испытания макета ИДТ

Методом обдува гелием все сварные швы и разъемные соединения макета ИДТ были проверены на герметичность с использованием штатного течеискателя стенда. Течей в сварных швах и разъемных соединениях вакуумного корпуса не обнаружено. Уровень фона гелия: $<1\cdot10^{-12}$ лторр/с. Полученное остаточное давление в объеме стенда после 1 часа непрерывной откачки с уровня атмосферного давления составило ~ $2\cdot10^{-7}$ Торр.

Одной из особенностей индукционного датчика тока является возможность проведения простых лабораторных исследований его рабочих характеристик в отсутствии реального пучка частиц. Использование стандартного лабораторного генератора сигналов позволяет имитировать импульсы пучка для анализа основных рабочих характеристик датчика (Рисунок 2.1.11).

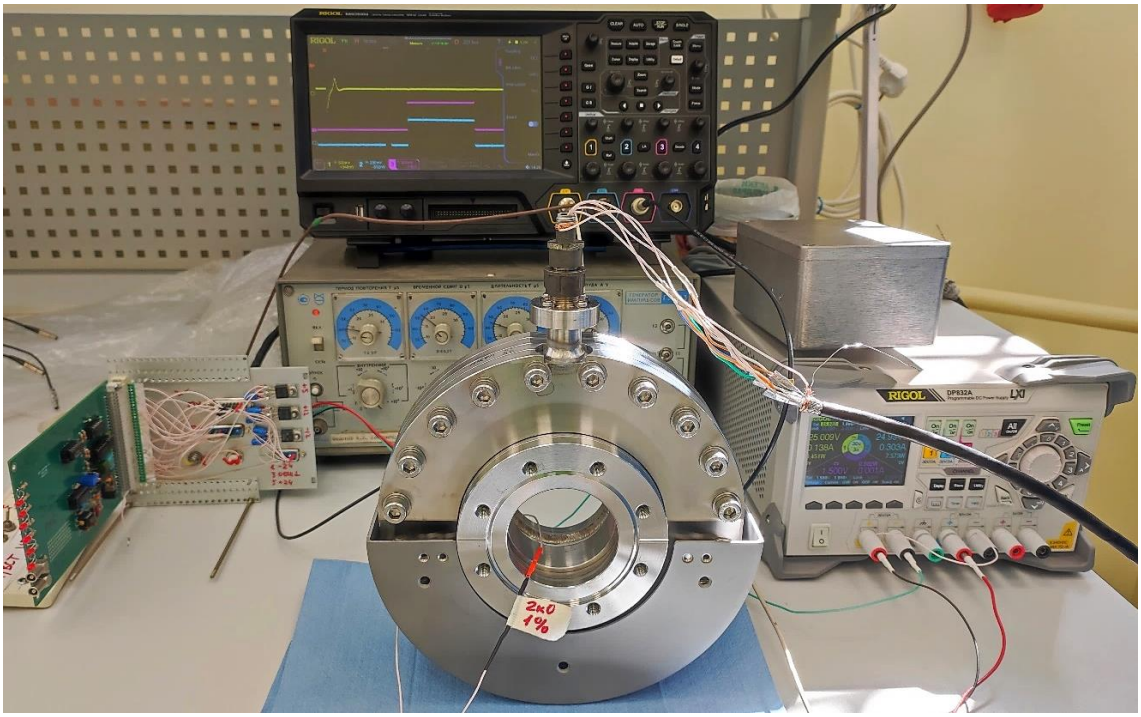


Рисунок 2.1.11 – Исследование электротехнических характеристик ИДТ

По итогам лабораторных испытаний было показано, что ИДТ позволяет измерять форму и длительность импульсов тока пучка с фронтами >100 нс при величине спада вершины импульса ~0.02%/мкс (Рисунок 2.1.12). Номинальная величина измеряемого тока определяется настройками УПР.

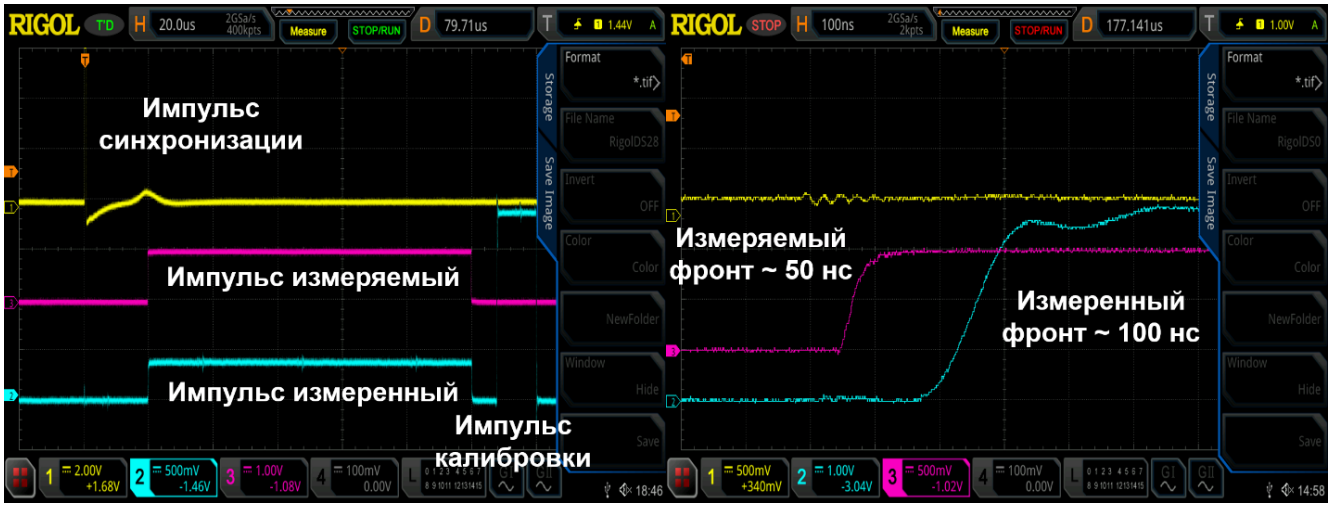


Рисунок 2.1.12 – Результаты измерений тестовых импульсов тока на ИДТ

На рисунке 2.1.13 приведены результаты лабораторных измерений среднеквадратичной амплитуды выходного сигнала ИДТ, регистрируемого под влиянием поперечного к датчику электромагнитного поля низкочастотной помехи 50 Гц. Среднеквадратичная амплитуда магнитного поля помехи измерялась магнитометром в режиме регистрации синусоидальных полей.

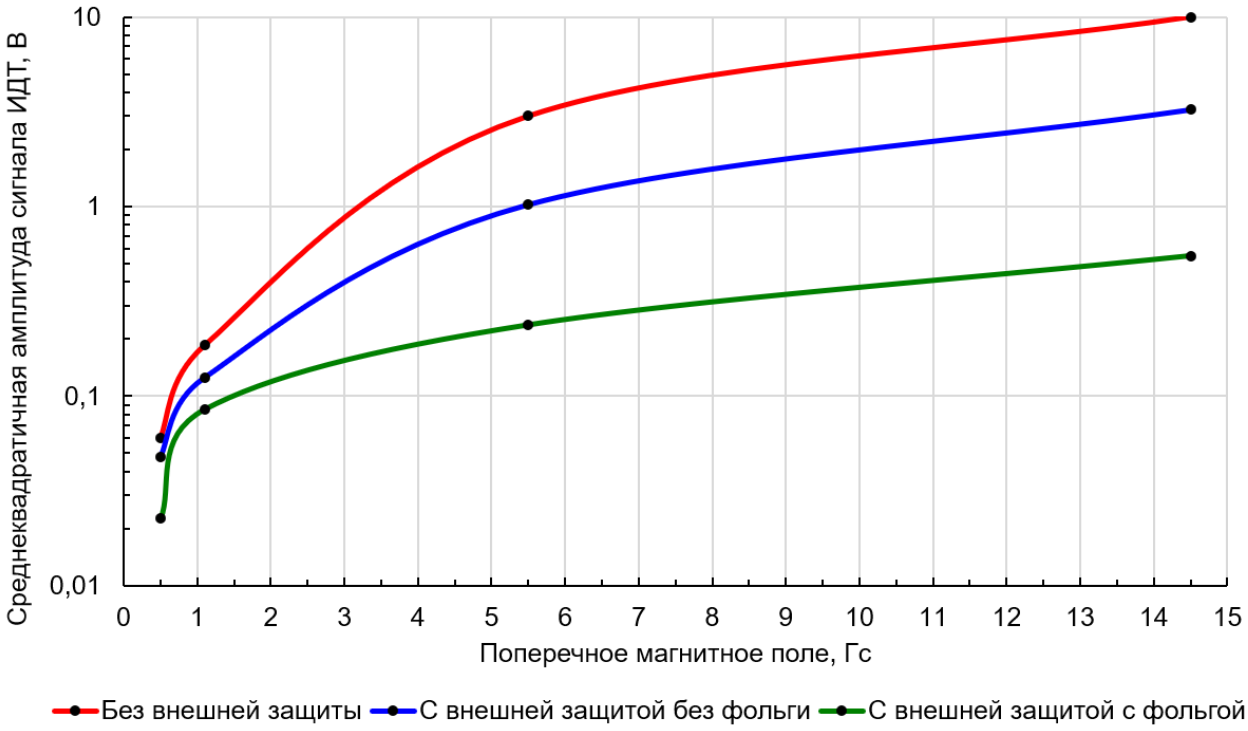


Рисунок 2.1.13 – Влияние поля внешней поперечной помехи 50 Гц на сигнал ИДТ

Пучковые испытания ИДТ и измерения токовых характеристик пучка

ИДТ данного типа с апертурой 60 мм были установлены для измерений в нескольких точках ЛУ ИЯИ РАН: на участке 158 МэВ, перед поворотом пучка на изотопный комплекс (Рисунок 2.1.14) и на выходе ускорителя, на канале транспортировки пучка к стенду протонного облучения (Рисунок 2.1.15).

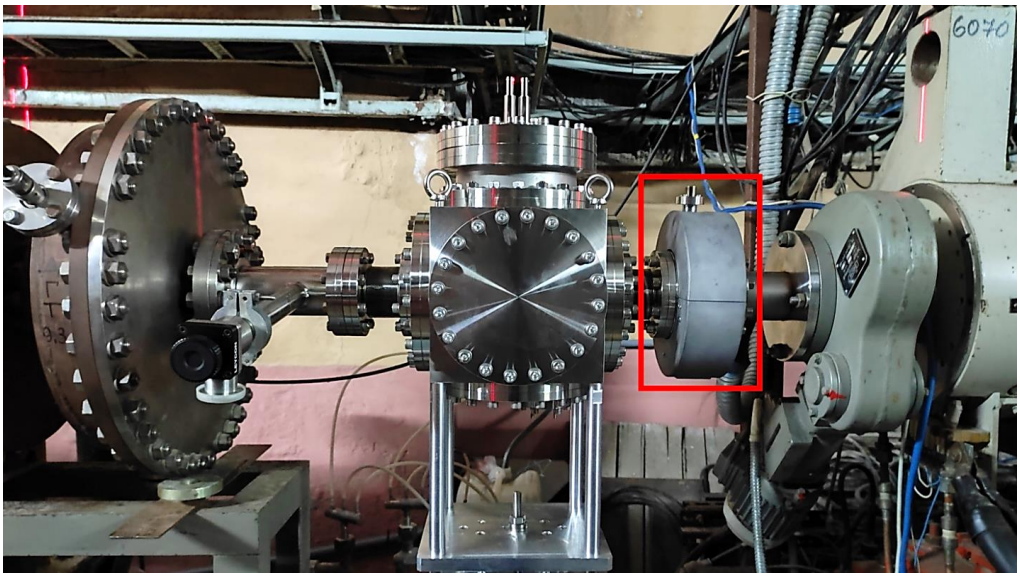


Рисунок 2.1.14– ИДТ (в красной рамке), установленный перед поворотом пучка на изотопный комплекс ЛУ ИЯИ РАН

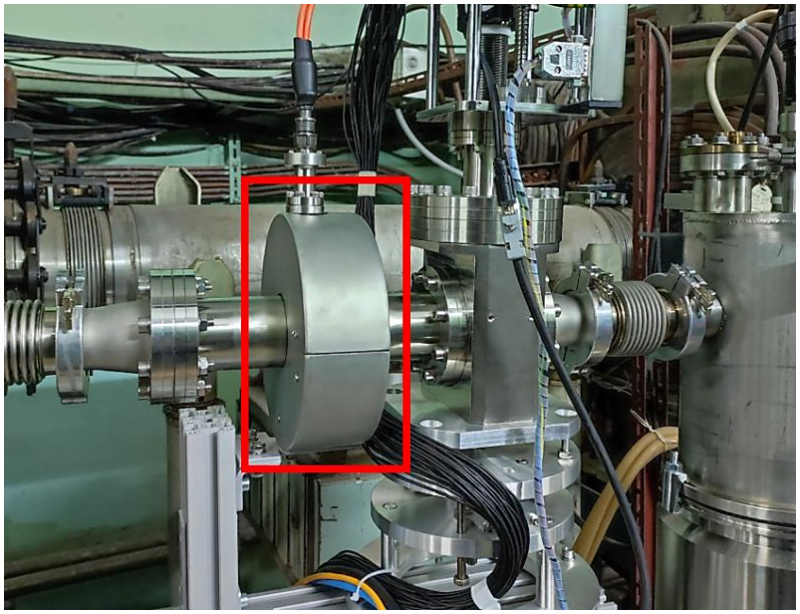


Рисунок 2.1.15 – ИДТ (в красной рамке), установленный на выходе ЛУ ИЯИ РАН, на канале транспортировки пучка к стенду протонного облучения

Типичные результаты измерений тока пучка приведены на Рисунке 2.1.16.

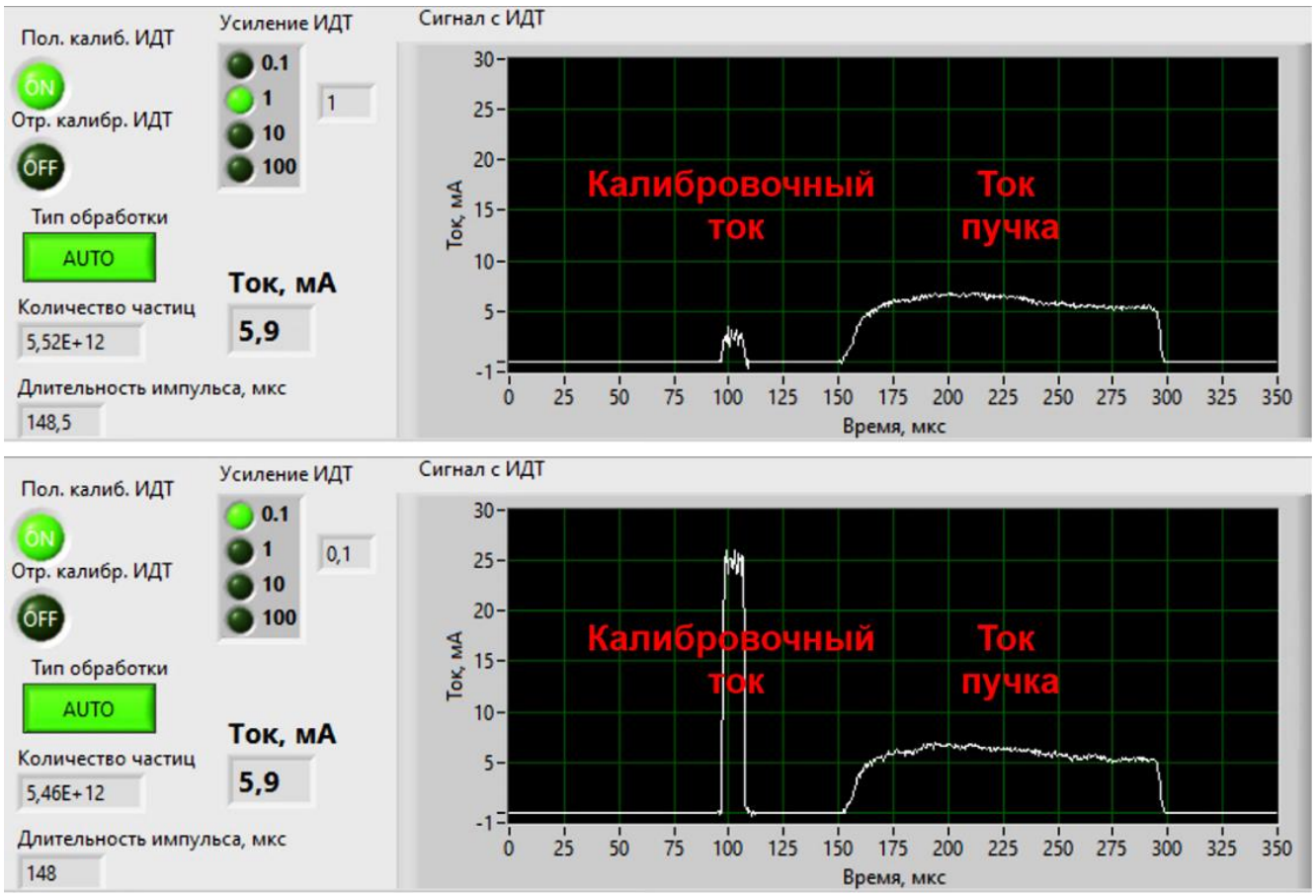


Рисунок 2.1.16 – Пример измерений тока пучка на ИДТ с возможностью переключения амплитуды калибровочного тока (2.5 мА, 25 мА)

Используемое программное обеспечение на основе LabVIEW объединяет в одном окне для оператора пучка как обработку исходных данных ИДТ, с индикацией амплитуды и длительности тока, так и возможность управления коэффициентом усиления и полярностью калибровки при работе с пучками частиц разной полярности. Автоматическая обработка данных с определением положения фронтов импульса тока пучка обычно осложнена низкочастотными помехами от технологических подсистем ускорителя, вызывающими смещение нуля оцифрованного сигнала. Это не позволяет применить пороговый метод определения фронта и требует более сложного алгоритма.

Запишем разность двух скользящих средних D(X) для дискретного сигнала X:

$$d_i = \frac{1}{n}\sum_{j=i}^{i+n-1} x_j - \frac{1}{n}\sum_{j=i-1}^{i-n} x_j = \frac{1}{n}\sum_{j=i}^{i+n-1}(x_j - x_{j-n}),\ i \in \mathrm{Z}, \tag{2.1.2}$$

где n – количество точек, по которым ведется усреднение.

В случае, когда сигнал X представляет собой единичный скачок:

$$x_i = \begin{cases} 0, i < 0 \\ 1, i \geq 0 \end{cases},\ i \in \mathrm{Z}, \tag{2.1.3}$$

разность D(X) описывает треугольный импульс длительностью 2n+1:

$$d_i = \frac{n - |i|}{n} \tag{2.1.4}$$

При воздействии низкочастотной помехи можно считать, что за время измерения уровень нуля сигнала меняется линейно, т.е.

$$\overline{x_i} = \begin{cases} 0 + ki,\ i < 0 \\ 1 + ki,\ i \geq 0 \end{cases} \tag{2.1.5}$$

Тогда $d_i = \frac{1}{n}\sum_{j=i}^{i+n-1}(\overline{x_j} - \overline{x_{j-n}}) = kn + \frac{1}{n}\sum_{j=i}^{i+n-1}(x_j - x_{j-n})$ смещается на величину kn.

Для измеренного сигнала Y с неидеальными фронтами разность D(Y) отличается от треугольной формы, поэтому для определения положения фронтов вычисляется взаимная корреляционная функция (ВКФ) сигналов D(Y) и D(X). По положению максимумов и минимумов ВКФ находятся соответственно передние и задние фронты обрабатываемого сигнала.

Оцифровка сигнала датчика в течение 1 с позволяет использовать ИДТ в качестве счётчика частоты следования импульсов тока пучка, как для автоматизированного подсчёта среднего тока, так и для организации системы аварийной защиты в ситуациях, когда зарегистрированная ИДТ частота почему-либо не совпадает с заданной для текущего режима работы ускорителя.

Также ИДТ позволяют оператору визуально контролировать форму импульса тока (Рисунки 2.1.17 – 2.1.18) для оптимизации прохождение пучка вдоль ускоряюще-фокусирующего канала линейного ускорителя, корректируя настройки элементов магнитооптики и/или ускоряющих ВЧ-резонаторов.

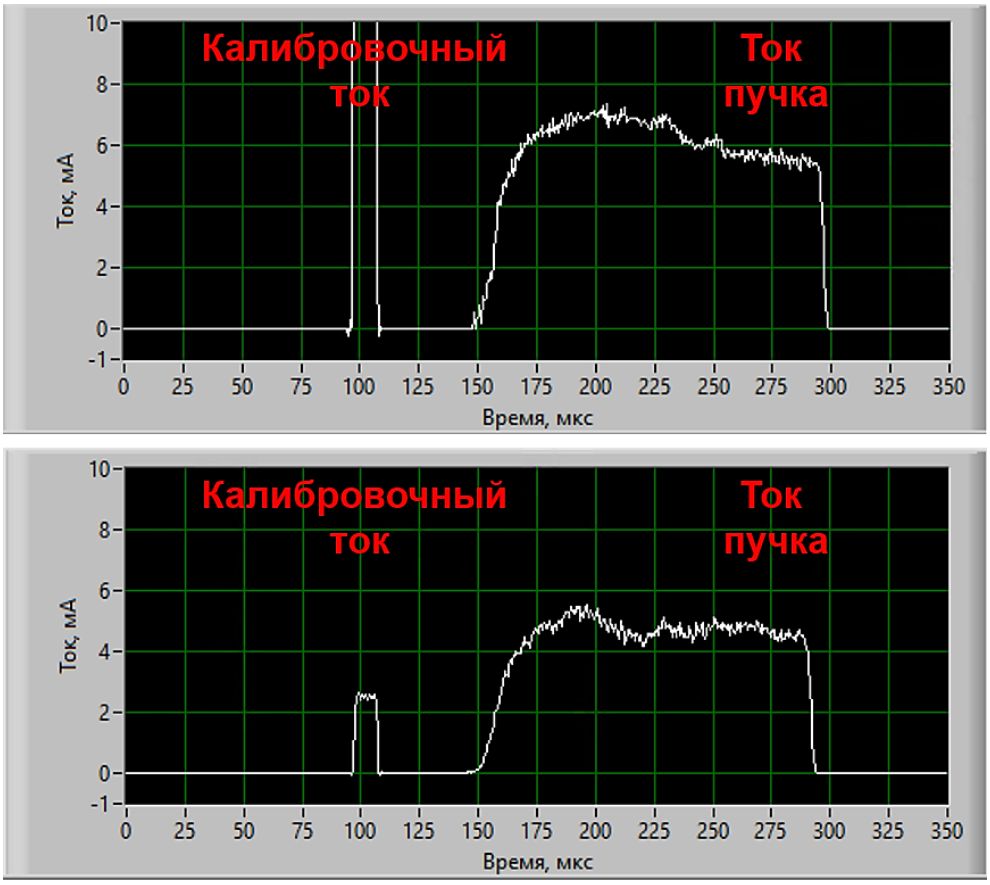


Рисунок 2.1.17 – Пример коррекции формы импульса тока пучка протонов длительностью ~150 мкс и током ~6 мА в процессе настройки ЛУ ИЯИ РАН

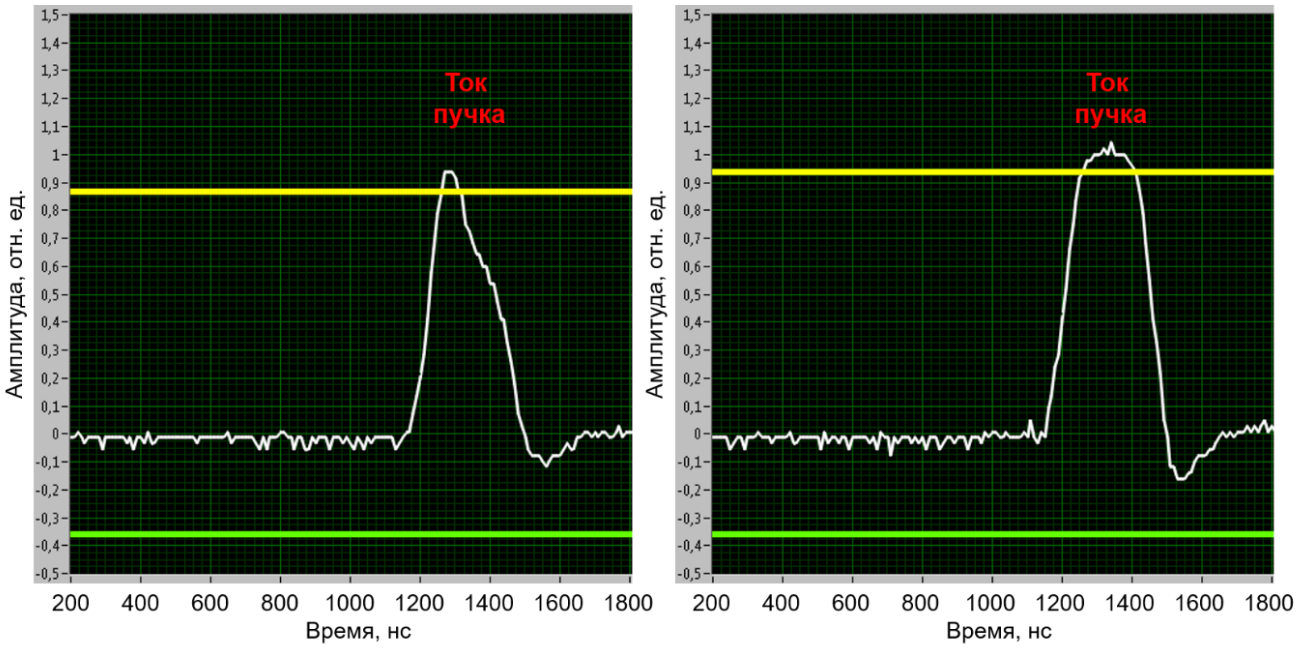


Рисунок 2.1.18 – Пример коррекции формы импульса тока пучка протонов длительностью ~300 нс и током ~6 мА в процессе настройки ЛУ ИЯИ РАН

Итоговые эксплуатационные параметры разработанных ИДТ

Всего было разработано 4 конфигурации ИДТ с различными рабочими параметрами для: ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ (Рисунок 2.1.19), ЛУ DARIA, ЛУ ИЯИ РАН и тестовых источников ионов в МИФИ. Разработанные ИДТ отличаются ферритовыми сердечниками с высокой начальной магнитной проницаемостью, многослойной электромагнитной защитой от влияния импульсных и статических магнитных полей, а также внешних наводок на промышленной частоте 50 Гц, и унифицированной технологией изготовления вакуумной камеры, позволяющей на этапе разработки конструкторской документации масштабировать всю сборку под конкретные требования на присоединительные апертурные фланцы датчика.

Исходя из результатов проведенных испытаний, разработанные ИДТ в совокупности обладают следующими параметрами:

- диапазон измеряемой амплитуды импульсов тока: 0.01 ÷ 150 мА;
- диапазон измеряемой длительности импульса тока: 0.1 ÷ 200 мкс;
- минимальная длительность фронта импульса: 0.05 мкс;
- спад вершины импульса: < 0.02 % / мкс;
- четыре переключаемых диапазона коэффициента усиления: 0.1, 1, 10, 100.

Рисунок 2.1.19 – Комплект изготовленных ИДТ для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ

Цилиндры Фарадея

Разработка и изготовление цилиндров Фарадея выполнялись для различных конфигураций: как стационарных, так и подвижных, с использованием ручных (Рисунок 2.1.20) и автоматизированных вакуумных вводов движения в соответствующих боксах. ЦФ комплектуются предусилительной электроникой и ячейками управления собственного производства.

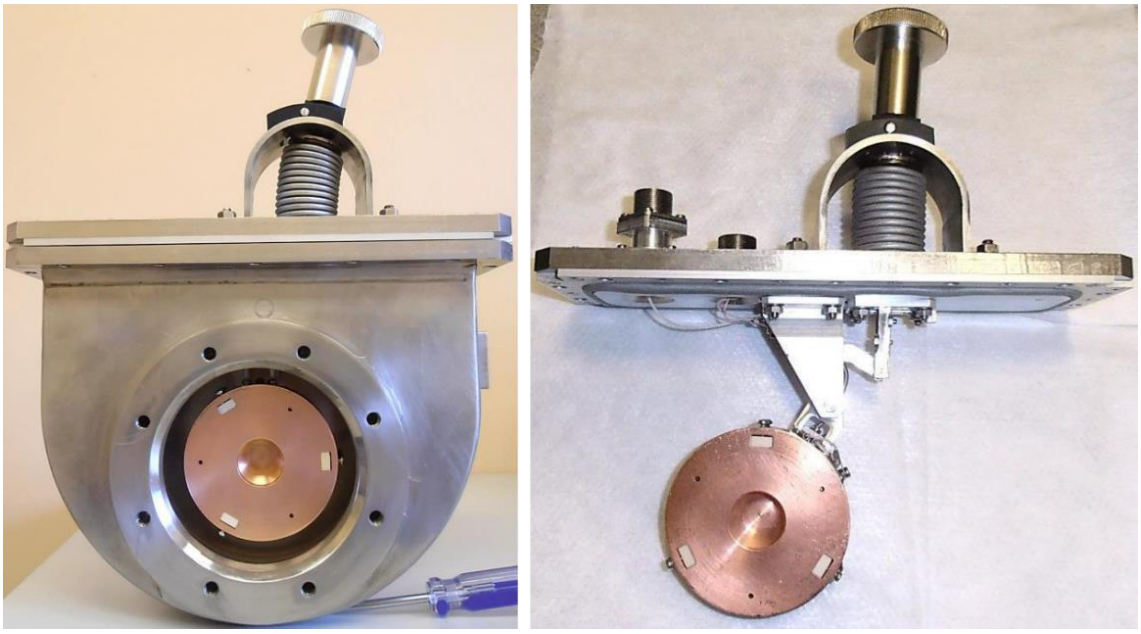


Рисунок 2.1.20 – ЦФ с ручным приводом для ЛУ-20 ОИЯИ

Конструктивные особенности

Наибольший интерес представляют вакуумированные охлаждаемые цилиндры Фарадея с автоматизированными вводами движения. В частности, несколько таких конфигураций было разработано для ЛУ проекта DARIA [10].

Для прямых измерений тока пучка на низкоэнергетическом канале транспортировки этого ускорителя предусмотрен ЦФ с рабочей апертурой 100 мм, который, в виду высокой средней и импульсной мощности пучка, также играет роль аварийной охлаждаемой ловушки, позволяющей блокировать пучок на входе в ускоряюще-фокусирующий канал для защиты ускорителя в нештатных ситуациях или на время проведения настроечных процедур.

Предлагаемый к использования подвижный цилиндр Фарадея с непрямым охлаждением размещен в отдельной вакуумной камере с присоединительными фланцами CF100 и суммарной установочной длиной 134 мм, а для ввода/вывода ЦФ с установленной системой охлаждения в рабочую апертуру ионопровода использован сильфонный вакуумный ввод линейного движения на основе шагового двигателя (Рисунок 2.1.21). Непрямое охлаждение основано на использовании диска из нитрида алюминия (~170 Вт/(м*К)) толщиной 1 мм, изолирующего сигнальный электрод от охлаждаемой сборки из двух медных пластин с запрессованной и пропаянной между ними цельнотянутой медной трубкой Ø 6×1 мм, по которой прокачивается вода из основной системы охлаждения ускорителя. Выводы медной трубки на атмосферу выполнены на основе «грибковых» соединений, уплотненных витоновыми кольцами с использованием высокотемпературной высоковакуумной смазки.

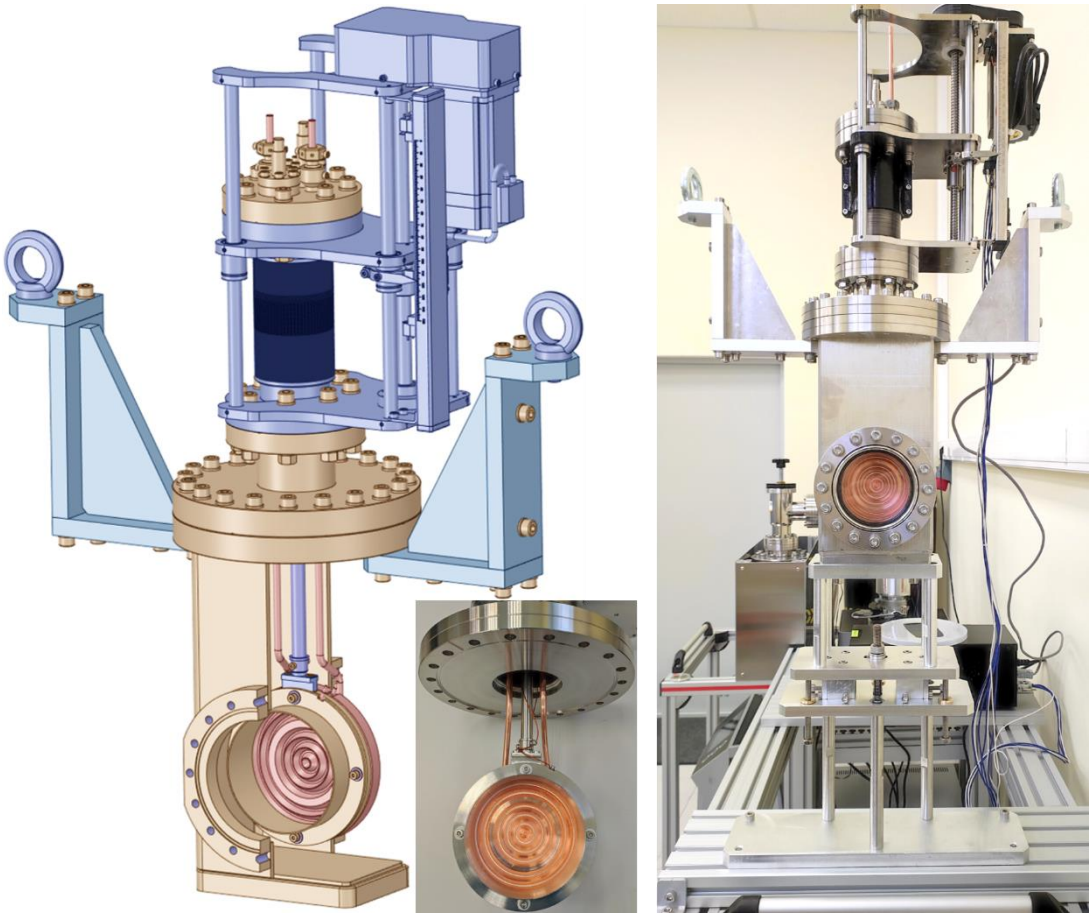


Рисунок 2.1.21 – Трехмерная модель и фотография ЦФ для ЛУ DARIA

Сборка прикрепляется к сигнальному электроду с помощью массива вентилируемых винтов через изолирующие втулки из нитрида алюминия и пружинные шайбы, для компенсации теплового расширения материалов ЦФ.

Для подавления ВЭЭ предусмотрен кольцевой электрод из нержавеющей стали под фиксированным потенциалом смещения до -5 кВ, подаваемым от отдельного источника высоковольтного напряжения через разъем SHV-5 DN16CF. Сигнальный электрод, находящийся под потенциалом виртуальной земли предусилительной электроники, изготавливается из меди для обеспечения высокой электро- и теплопроводности и имеет плоскую геометрию для сокращения продольных размеров. На поверхности электрода сделаны V-образные кольцевые канавки для двукратного увеличения площади взаимодействия электрода с пучком с целью снижения поверхностной плотности мощности тепловыделения. Отношение продольного размера детектирующей сборки к рабочей апертуре ~1/2.

Параметры электроники

Предварительный усилитель цилиндра Фарадея выполняется по схеме усилителя для индукционного датчика тока и дополнительно оснащается источником напряжения смещения, а также встроенным калибратором для балансировки тракта усиления электроники. УПР монтируется в стандартный алюминиевый корпус РЭА.

Пучковые испытания ЦФ и измерения токовых характеристик пучка

Испытания работоспособности ЦФ (Рисунок 2.1.22) были проведены на канале инжекции пучка протонов линейного ускорителя ИЯИ РАН со следующими параметрами: энергия 400 кэВ, частота следования импульсов 50 Гц, длительность импульсов ~ 77 ÷ 179 мкс, импульсный ток ~ 0.5 ÷ 71.0 мА, среднеквадратичный радиус ~ 5 мм. Максимальная средняя мощность пучка на ЦФ во время испытаний не превышала 255 Вт.

Система водяного охлаждения ЦФ была подключена к штатной системе охлаждения элементов канала при этом температура и расход воды на выходе и входе ЦФ были равны друг другу и не менялись в ходе испытаний, оставаясь равными 13 °C и ~2 л/мин соответственно при давлении ~4 кгс/см^2.

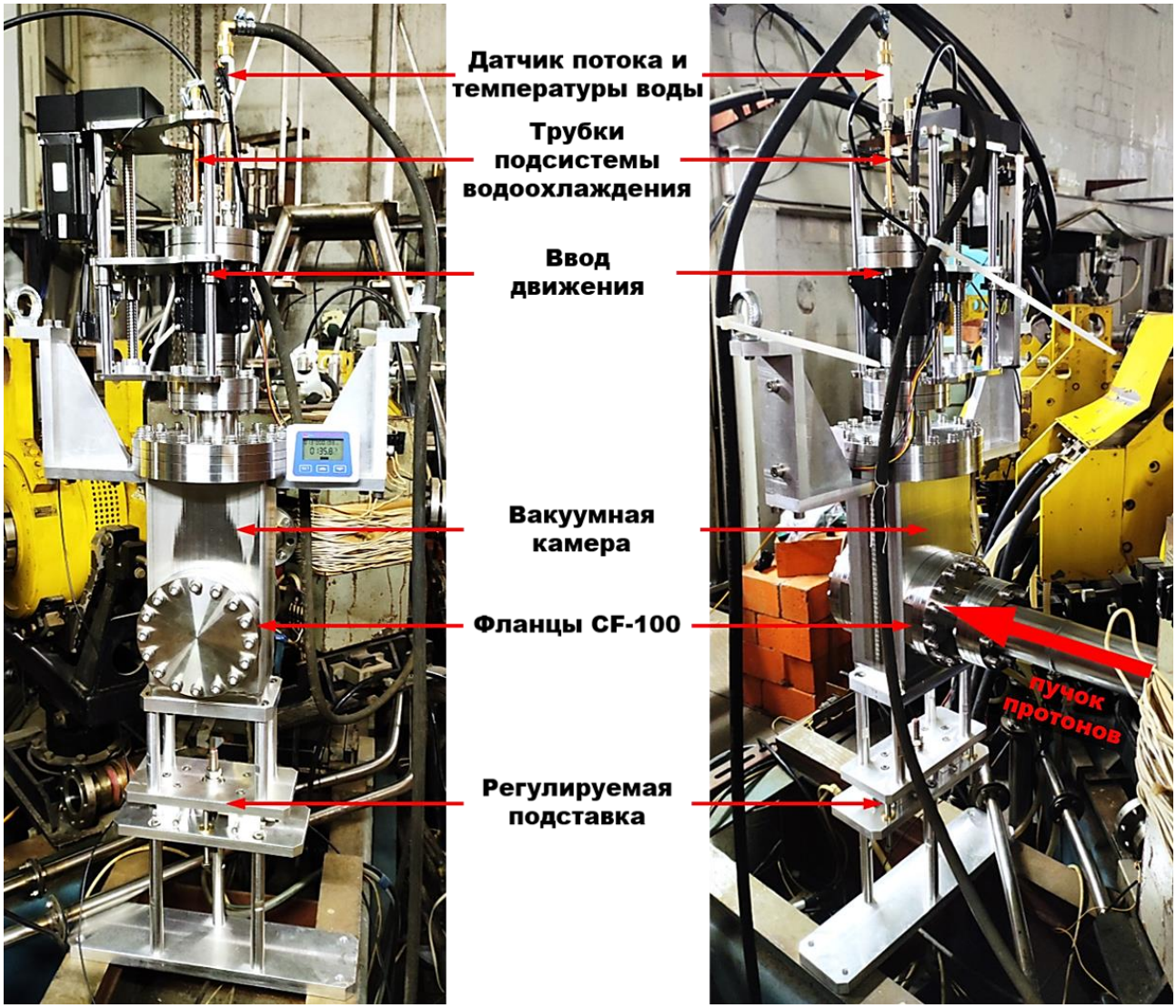


Рисунок 2.1.22 – Фотографии охлаждаемого цилиндра Фарадея, вовремя испытаний на канале инжекции протонов линейного ускорителя ИЯИ РАН

На рисунке 2.1.23 показаны примеры экспериментально измеренных в ходе пучковых испытаний импульсов тока пучка с разными величинами длительности и амплитуды, зарегистрированными при разных коэффициентах усиления предусилительной электроники.

На рисунке 2.1.24 показана измеренная зависимость минимально необходимого напряжения смещения от величины импульсного тока пучка. Полное подавление вторично-эмиссионных электронов при максимальном импульсном токе пучка ~ 71 мА наблюдалось при напряжении смещения ~ -0.9 кВ.

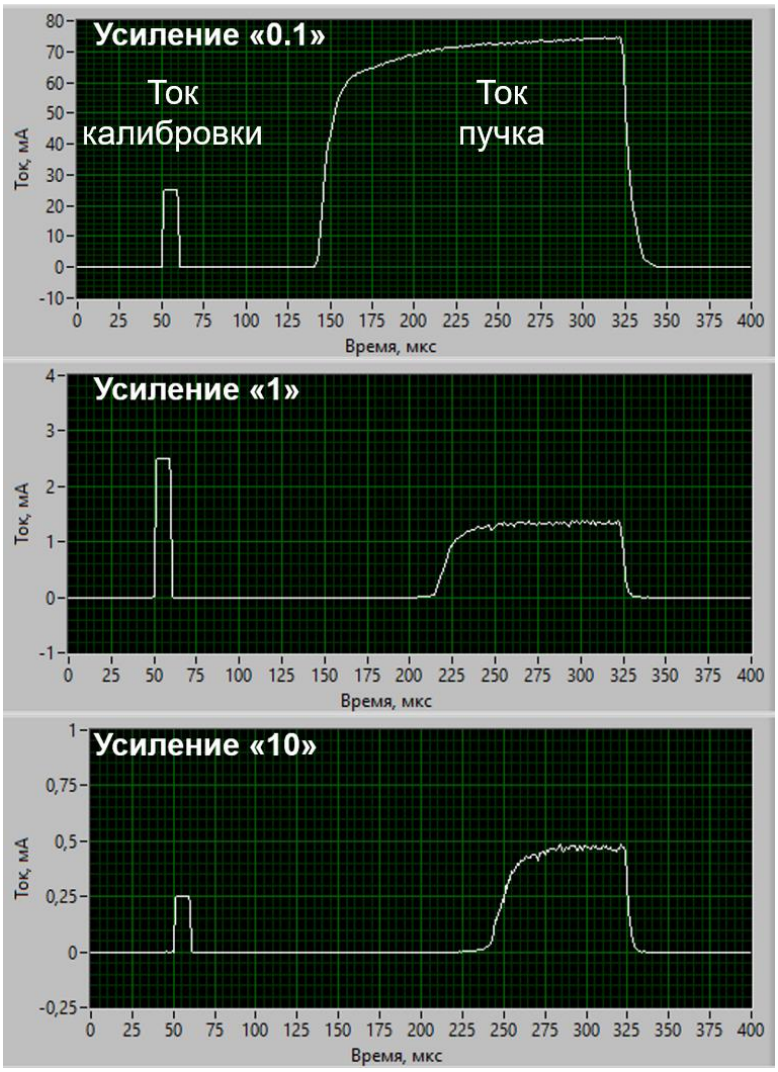


Рисунок 2.1.23 – Примеры измерений тока пучка на ЦФ во время испытаний

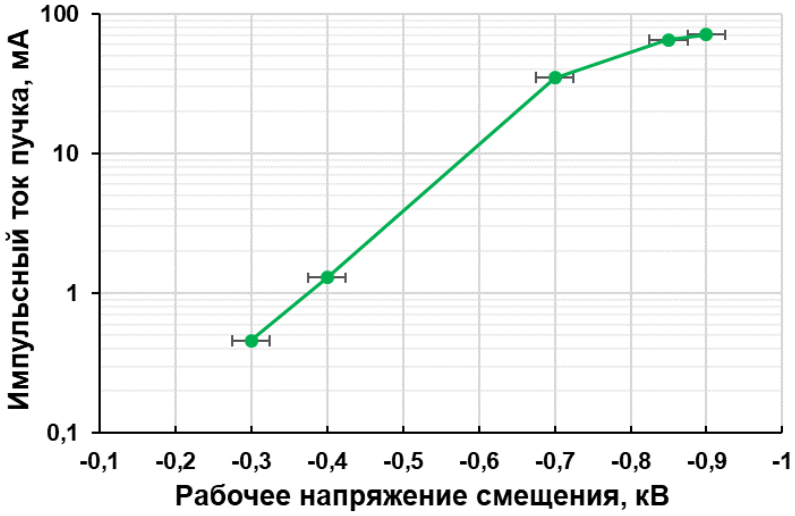


Рисунок 2.1.24 – Зависимость минимально необходимого напряжения смещения в сборке испытываемого ЦФ от импульсного тока пучка

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик

Моделирование тепловых нагрузок при испытаниях и в номинальных режимах работы для предложенной геометрии ЦФ было выполнено в ПО COMSOL Multiphysics в предположении, что:

- ионизационные потери пучка полностью переходят в тепло,
- теплоемкость, теплопроводность, коэффициент излучения поверхности и плотность материалов зависят от температуры согласно данным библиотеки COMSOL Multiphysics,
- геометрические параметры пучка: $\sigma_X = \sigma_Y = 5$ мм.

Результаты стационарных расчетов распределения температуры при испытательной тепловой нагрузке средней мощностью пучка приведены на рисунке 2.1.25. Нагрев сигнального электрода при непрерывном облучении пучком с мощностью 255 Вт не превышает 65 °С на входной поверхности сигнального электрода при температуре охлаждающей воды 13 °С, таким образом, данный ЦФ можно использовать не только для наладочных измерений, но и как ловушку полного среднего тока пучка (1 мА, 60 КэВ) в канале LEBT ускорителя DARIA.

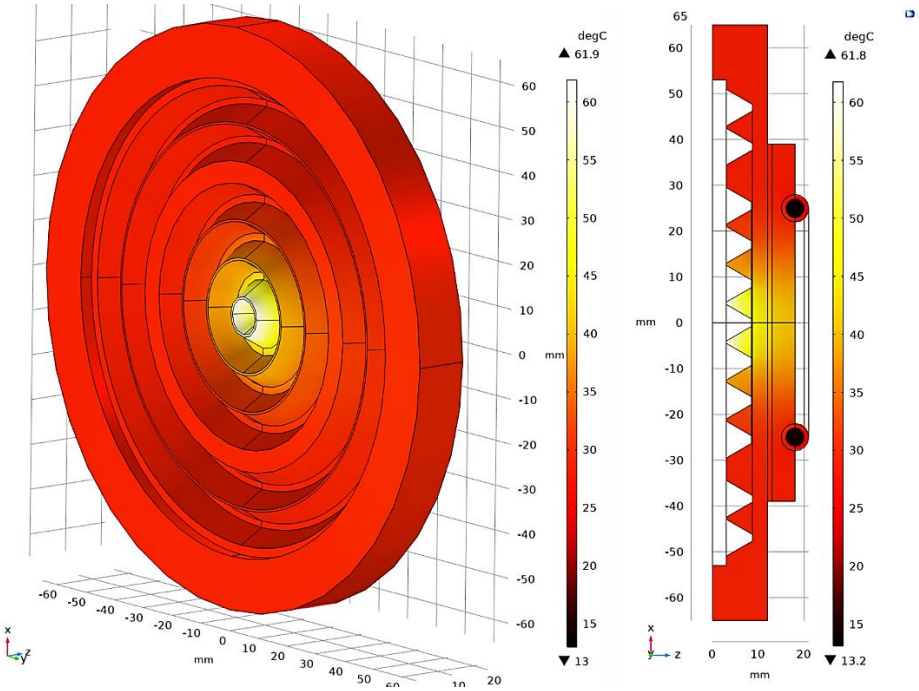


Рисунок 2.1.25 – Распределение температуры в модели охлаждаемого ЦФ под воздействием пучка протонов энергией 400 кэВ и средней мощностью 255 Вт

Максимальная средняя мощность, на которую рассчитана регулярная работа ЦФ при температуре охлаждающей воды 22 °С, составляет 800 Вт (при энергии пучка 3.3 МэВ), так как при этом температура поверхности трубки, контактирующей с водой, не превышает 60 °С, что минимизирует возможное выпадение осадка солей жесткости на стенки трубки охлаждения, а максимальная температура поверхности электрода не превышает 200 °С, что допустимо с точки зрения пластических деформаций элементов конструкции.

С учётом высокой импульсной мощности проектного пучка ускорителя DARIA (1.3 МВт) отдельным тепловым эффектом, требующим расчета, является импульсный нагрев поверхности и приповерхностного слоя сигнального электрода. Для номинальных параметров (ток 100 мА, длительность 100 мкс, среднеквадратичный радиус 5 мм) максимальная локальная температура в области входа пучка в сигнальный электрод ЦФ в конце импульса тока составляет ~200 °С для энергии пучка 3.3 МэВ (глубина проникновения пучка в электрод ЦФ ~40 мкм) и ~500 °С – для энергии 13 МэВ (глубина проникновения пучка ~380 мкм), что гарантирует отсутствие как импульсной термоэмиссии электронов, так и локальной пластической деформации сигнального электрода при облучении с частотой следования импульсов 1 Гц во всем проектном диапазоне энергий, таким образом, разработанный ЦФ может быть использован для измерений тока в наладочном режиме работы в любой части этого сильноточного линейного ускорителя протонов.

При импульсном токе протонного пучка в диапазоне >10÷20 мА сильное влияние на транспортировку пучка в низкоэнергетическом канале инжекции оказывает пространственный заряд пучка, который при этом существенным образом искажает электростатический потенциал смещения ЦФ, что приводит к необходимости использования киловольтных напряжений, т. к. только в этом случае суммарный потенциал на оси системы оказывается достаточным для полного подавления вылета вторичных электронов из апертуры цилиндра с поверхности плоского сигнального электрода.

Также известно, что в магнитооптических каналах без электрических полей эффективный потенциал пучка положительно заряженных частиц может уменьшаться за счёт компенсации пространственного заряда пучка электронами, образующимися при ионизации остаточного газа [4, 6].

Для проектного пучка DARIA энергией 60 кэВ и импульсным током 100 мА минимальный потенциал смещения составляет ~ -3 кВ без учета эффекта компенсации. Для оценки влияния этого эффекта на результаты пучковых испытаний было проведено трехмерное моделирование динамики вторичных электронов с типичным энергетическим спектром под влиянием суммарного потенциала (Рисунок 2.1.26) смещения -0.9 кВ и потенциала пространственного заряда пучка энергией 400 кэВ и среднеквадратичным радиусом 5 мм.

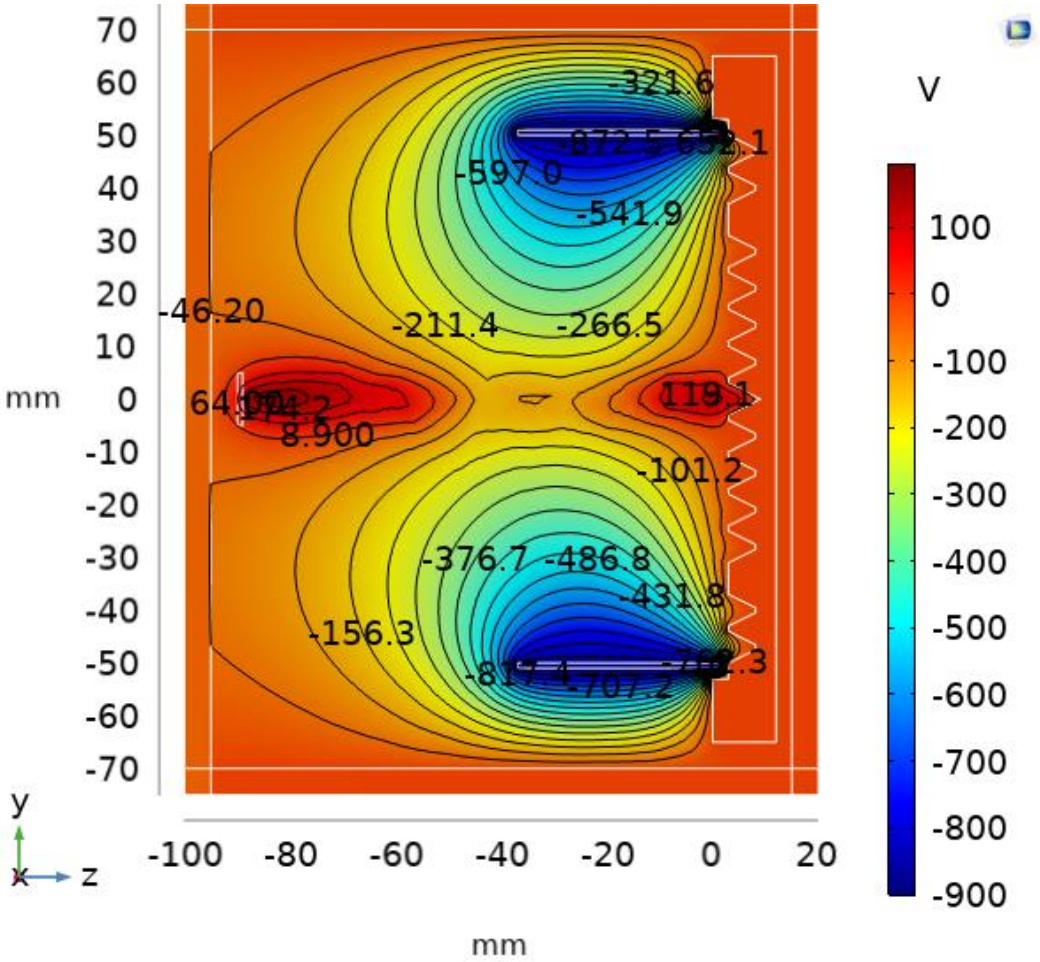


Рисунок 2.1.26 – Распределение суммарного электрического потенциала поля пучка протонов (400 кэВ, 64 мА) и поля смещения ЦФ -0.9 кВ

Максимальный импульсный ток пучка, при котором вторичные электроны возвращаются на сигнальный электрод ЦФ в заданной геометрии (Рисунок 2.1.27) составил ~64 мА, т. е. наблюдаемая в процессе измерений эффективная компенсация пространственного заряда в присутствии электрического поля ЦФ составила ~10%.

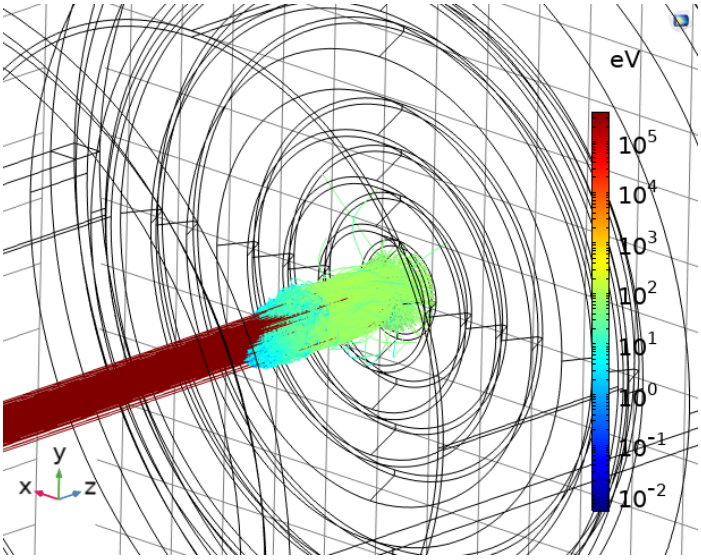


Рисунок 2.1.27 – Траектории частиц пучка и вторичных электронов под действием суммарного потенциала поля пучка (400 кэВ, 64 мА) и полясмещения ЦФ (-0.9 кВ)

В ходе разработки охлаждаемого ЦФ для ЛУ DARIA также была предложена более компактная конструкция для использования только в LEBT (Рисунок 2.1.28).

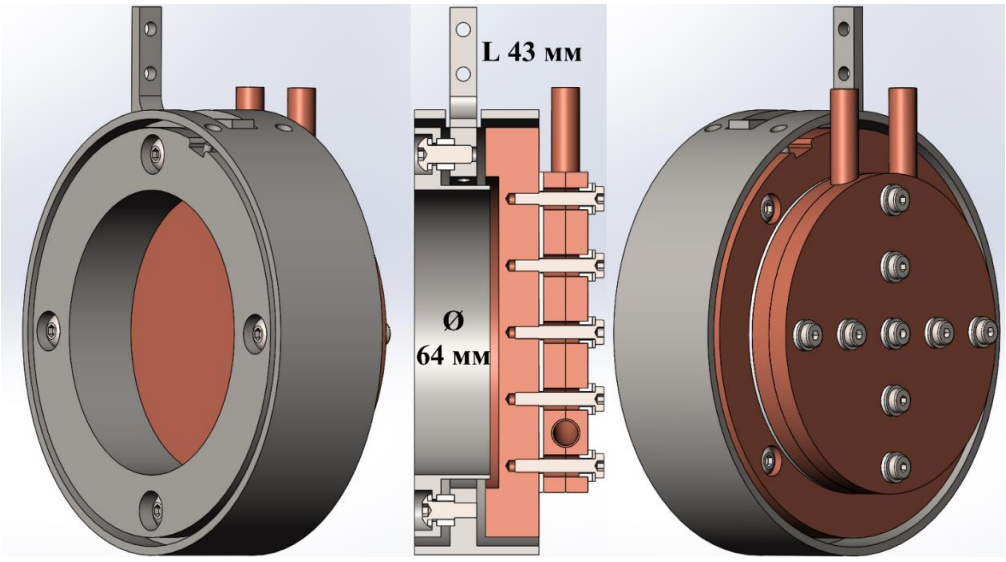


Рисунок 2.1.28 – Трехмерная модель компактного охлаждаемого ЦФ апертурой 64 мм

Импульсный точечный нагрев поверхности сигнального электрода в этой конфигурации не превышает температуру 360 К, что гарантирует отсутствие импульсной термоэмиссии и возможных тепловых деформаций из-за общего перегрева сигнального электрода под пучком.

Результаты стационарных расчетов распределения температуры при тепловой нагрузке средней мощностью пучка приведены на рисунке 2.1.29. Нагрев сигнального электрода при длительном облучении пучком с мощностью 200 Вт не превышает 55÷60 °С, таким образом, данный ЦФ тоже можно использовать не только для наладочных измерений, но и как ловушку полного среднего тока пучка в канале LEBT.

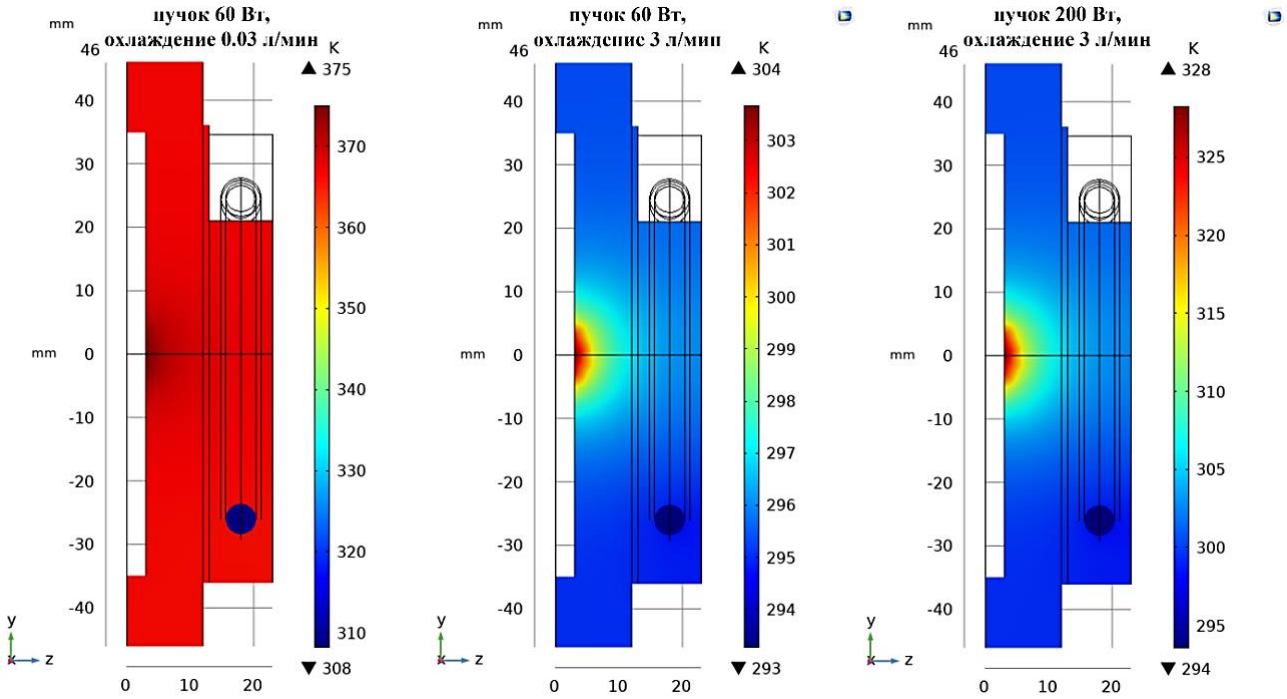


Рисунок 2.1.29 – Распределение температуры в поперечном сечении охлаждаемого ЦФ с апертурой 64 мм

Для оценки эффективности подавления ВЭЭ было проведено трехмерное моделирование (Рисунок 2.1.30) динамики вторичных электронов с энергией ~50 эВ в присутствии пространственного заряда пучка с импульсным током 100 мА, энергией 60 кэВ и среднеквадратичным размером ~3 мм. Минимальная величина напряжения смещения в данном случае должна достигать ~ –3 кВ.

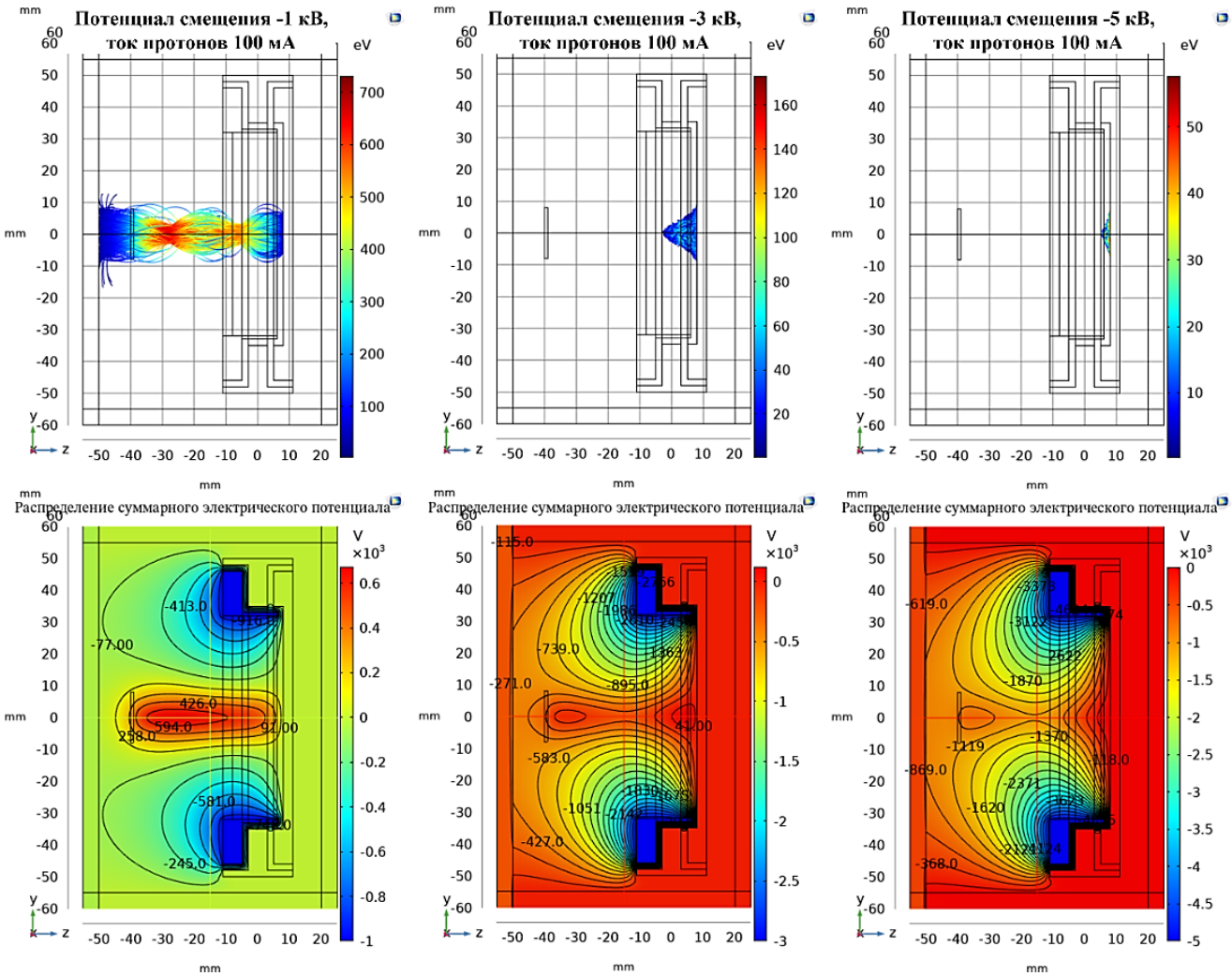


Рисунок 2.1.30 – Траектории вторичных электронов, вылетающих из сигнального электрода, с учетом суммарного влияния пространственного заряда пучка и потенциала смещения ЦФ

Итоговые эксплуатационные параметры разработанных ЦФ

Исходя из результатов численного моделирования и проведенных испытаний, разработанные компактные охлаждаемые ЦФ в совокупности обладают следующими параметрами:

- диапазон измеряемой амплитуды импульсов тока: 0.01 ÷ 150 мА;
- диапазон измеряемой длительности импульса тока: 0.1 ÷ 200 мкс;
- минимальная длительность фронта импульса: 0.05 мкс;
- четыре переключаемых диапазона коэффициента усиления: 0.1, 1, 10, 100;

- максимальная энергия: < 45 МэВ (ограничена толщиной электрода ЦФ);
- максимальная импульсная плотность мощности при облучении на частоте 1 Гц: $200 \cdot E_{пучка}$[МэВ] Вт/мм^2 (ограничена локальным импульсным перегревом входной поверхности электрода ЦФ);
- максимальная средняя мощность пучка: < 1 кВт (ограничена расчетной средней мощностью теплосъема системы охлаждения ЦФ);
- максимальное напряжение смещения для регистрации импульсного тока пучка 100 мА (при энергии 60 кэВ) без учета эффекта компенсации пространственного заряда: -3 кВ.

В разработанных конфигурациях неохлаждаемых ЦФ для линейных ускорителей ОИЯИ (Рисунок 2.1.31), РФЯЦ-ВНИИЭФ и ИЯИ РАН напряжение смещения не превышает -300 В и подаётся на электрод смещения от встроенного источника в предварительном усилителе.

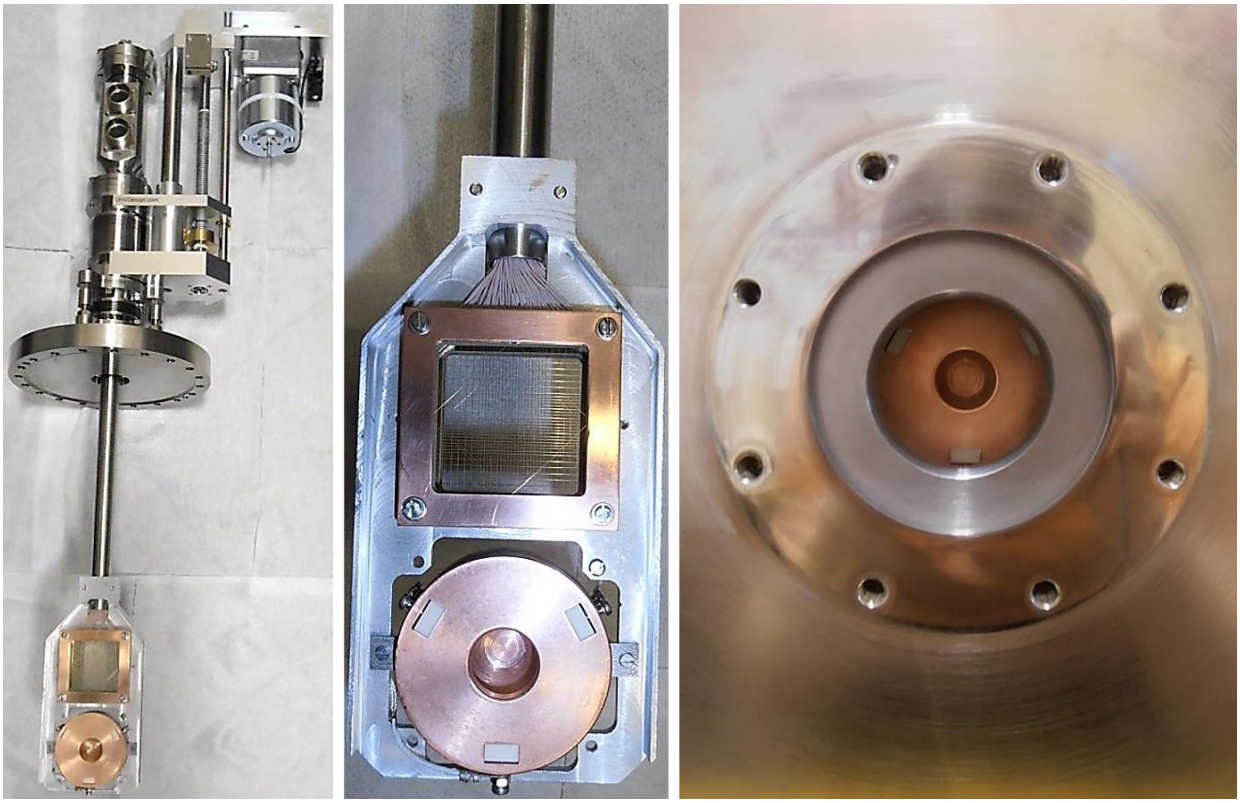


Рисунок 2.1.31 – Неохлаждаемый ЦФ, совмещенный с многопроволочным профилометром в диагностическом боксе для HILAC ОИЯИ

2.2 *Измерители поперечного профиля пучка*

Проволочные сканеры

Разработка и изготовление двух-проволочных сканеров выполнялись с использованием автоматизированных вакуумных вводов движения на основе шаговых двигателей в соответствующих вакуумных камерах. Сканеры комплектуются интегрирующей электроникой и ячейками управления собственного производства.

Конструктивные особенности

Двухпроволочные сканеры изготавливались в виде двух взаимно перпендикулярных проволочек из позолоченного вольфрама диаметром 100 мкм, закрепленных на вилке в зажимах с пружинной системой натяжения (Рисунок 2.2.1). Вилка фиксируется на штоке компактного моторизованного прецизионного ввода движения с шаговым двигателем. Для предотвращения эффекта «кросс-токов» ВЭЭ был использован метод подачи отрицательных потенциалов смещения до -100 В на сигнальные проволочки.

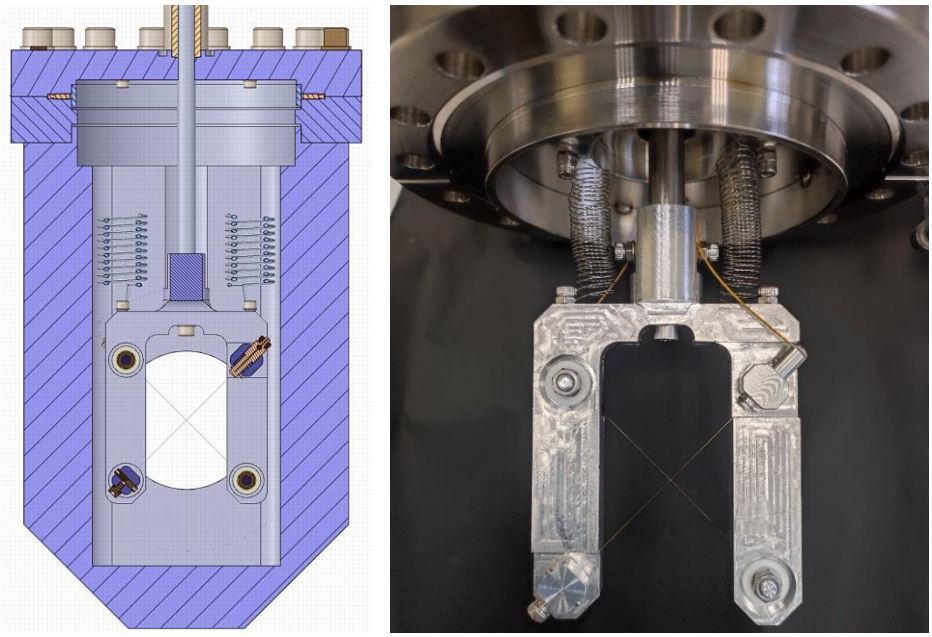


Рисунок 2.2.1 – Трехмерная модель и фотография вилки изготовленного двухпроволочного сканера для РФЯЦ-ВНИИЭФ

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик

Максимальная температура нагрева проволочной мишени ограничена величиной 1700÷1800 К, определяемой началом процесса термоэлектронной эмиссии. Для сравнения проводилось моделирование тепловых нагрузок проволок из вольфрама и углерода.

Расчет тепловых нагрузок проволочных мишеней выполнялся в COMSOL Multiphysics по авторской методике [22] в два этапа, в предположении, что:

- ионизационные потери пучка полностью переходят в нагрев, причем для пучков многозарядных ионов величина потерь определяется по данным ПО SRIM & TRIM, где зарядовое состояние иона внутри мишени описывается моделью эффективного заряда, не зависящего от начального заряда иона;
- проволока заданного диаметра и длины расположена в центре пучка; концы проволоки, закреплены в массивных держателях, имеющих фиксированную температуру 293 К;
- теплоемкость, теплопроводность и коэффициент излучения поверхности вольфрама и углерода зависят от температуры согласно обобщенным табличным данным (Рисунок 2.2.2).

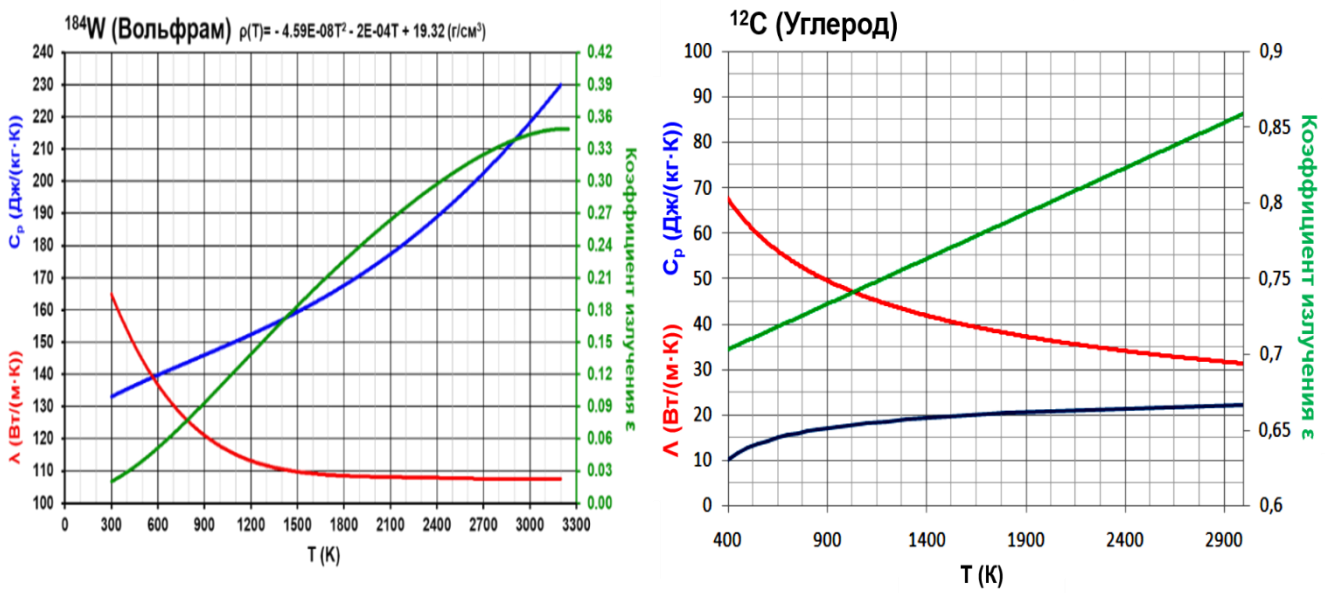


Рисунок 2.2.2 – Зависимость параметров вольфрама и углерода от температуры

На первом этапе рассчитывается распределение плотности ионизационных потерь (Рисунок 2.2.3) при трассировке через мишень пробного пучка с заданной энергией и среднеквадратичным размером, но с фиксированным количеством частиц. Распределение частиц в поперечном сечении пучка считается двумерным нормальным с центром на оси проволоки. После этого рассчитанная плотность распределения энергии нормируется на импульсный ток пучка и используется как периодический источник нагрева мишени с заданными длительностью и частотой следования импульсов. Временна́я микроструктура пучка в модели не учитывается, поскольку типичные времена следования сгустков в линейных ускорителях ионов (единицы наносекунд) много меньше характерного времени тепловых процессов в проволочке, и точность расчетов практически не меняется, однако время вычислений сокращается значительно.

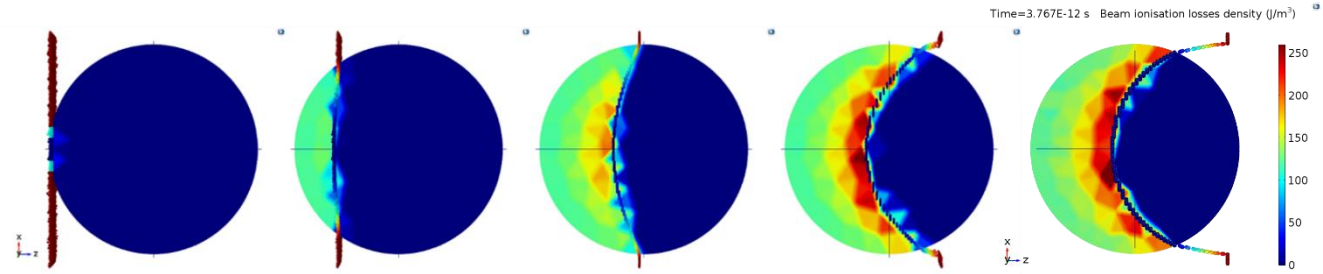


Рисунок 2.2.3 – Пример распределения ионизационных потерь пучка протонов энергией 3.6 MeV в поперечном сечении вольфрамовой проволоки диаметром 100 мкм

На втором этапе проводится тепловой расчет с учётом температурных характеристик материала. Наиболее часто для сканеров используются проволочки из вольфрама, углерода или ниобия диаметром от 10 до 100 мкм.

Типичный размер сетки конечных элементов для вычислений: 1/25 диаметра в поперечном сечении проволоки и 1/50 длины вдоль оси проволоки. Шаг по времени выбран адаптивным с размером порядка 1/100 длительности импульса при его прохождении через проволоку и 1/10 периода следования импульсов в наладочном режиме 1 Гц для расчета охлаждения проволоки между импульсами.

На рисунке 2.2.4 показан пример распределения температуры в поперечном сечении и на поверхности вольфрамовой проволоки диаметром 100 мкм при прохождении импульса тока протонов энергией 3.6 MeV длительностью 50 мкс.

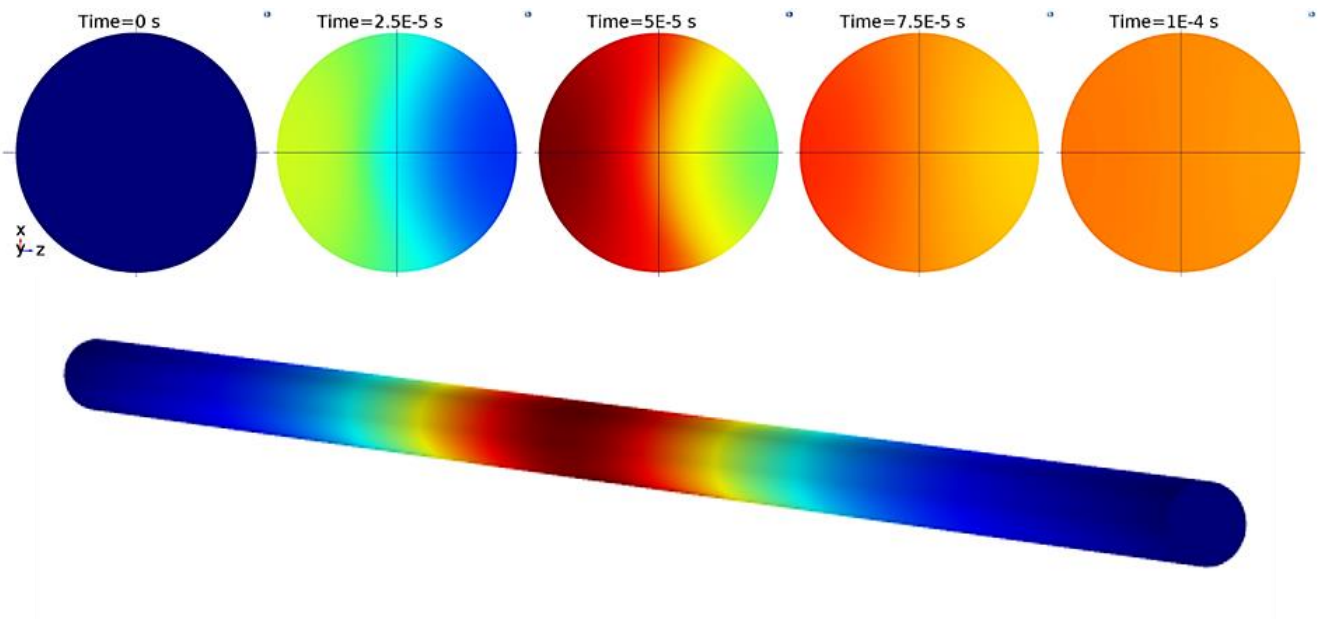


Рисунок 2.2.4 – Пример расчетного распределения температуры в поперечном сечении и на поверхности проволоки при прохождении импульса тока пучка

Помимо теплоемкости, теплопроводности и излучения, дополнительным механизмом охлаждения проволоки является эмиссия электронов, вылетающих из проволоки и уносящих часть энергии. Расчетное отношение энергии (в процентах), унесенной электронами из вольфрамовой проволоки с разным диаметром, к энергии ионизационных потерь протонов показано на рисунке 2.2.5, при этом абсолютные результаты для вольфрама и углерода отличаются в пределах 1%.

Для протонных пучков с энергией менее 100 МэВ эффект охлаждения проволоки за счёт эмиссии электронов можно не учитывать, т.к. для проволоки диаметром 100 мкм уносимая энергия составляет менее 5% энергии ионизационных потерь. Для более энергетичных пучков учёт этого эффекта в модели COMSOL осуществляется умножением на корректирующий коэффициент.

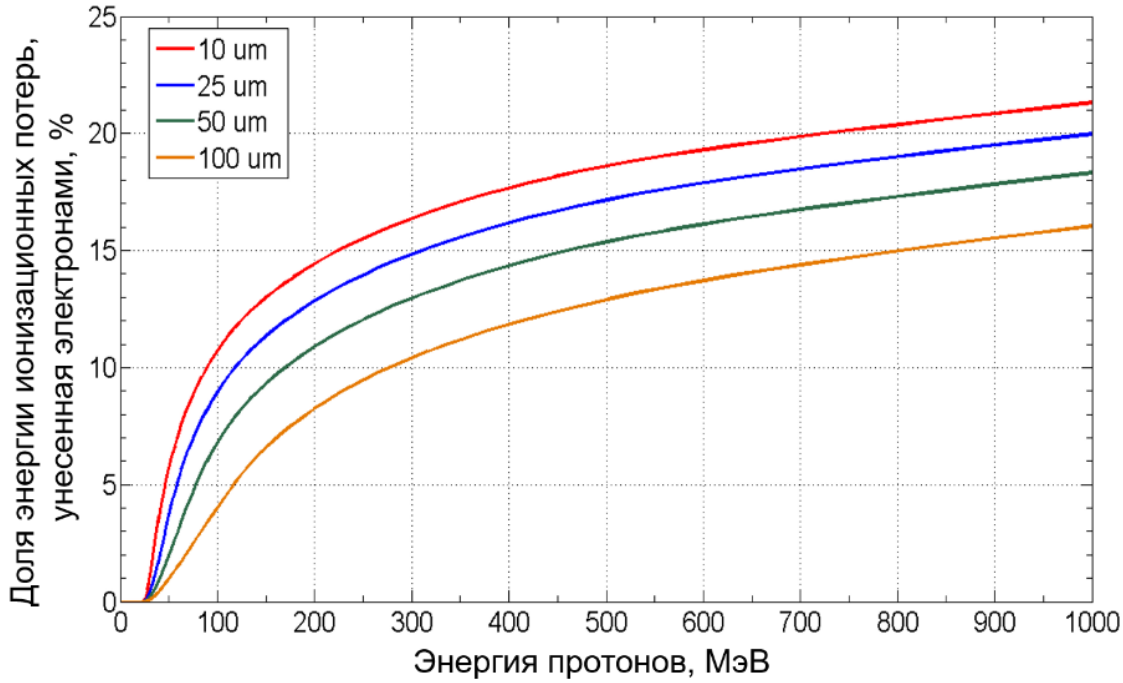


Рисунок 2.2.5 – Отношение энергии, унесенной электронами из вольфрамовой проволоки с разным диаметром, к энергии ионизационных потерь протонов

При фиксированной энергии и частоте следования макроимпульсов пучка температура проволоки определяется количеством прошедших через неё частиц и пропорциональна коэффициенту:

$$K = \left(\frac{I_{\text{импульс}}}{Q} \cdot \frac{\tau_{\text{импульс}}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}\right)^a, \tag{2.2.1}$$

где $I_{\text{импульс}}$ – импульсный электрический ток пучка, Q – заряд иона, $\tau_{\text{импульс}}$ – длительность импульса тока, σ_X, σ_Y – среднеквадратичные размеры пучка, a – полуэмпирический показатель степени, зависящий от энергии пучка и находящийся в диапазоне значений 0.3÷0.6.

Таким образом, зафиксировав величину коэффициента K, можно варьировать комбинации входящих в него параметров пучка и получать оценки режимов работы с одинаковой тепловой нагрузкой на проволочную мишень.

Примеры расчетов для вольфрамовой и углеродной проволок длиной 60 мм и диаметром 100 мкм при прохождении сильноточного пучка протонов ЛУ DARIA приведены в таблицах 2.2.1 и 2.2.2

Таблица 2.2.1 – Пример расчетного нагрева вольфрамовой проволоки диаметром 100 мкм под воздействием сильноточного пучка протонов.

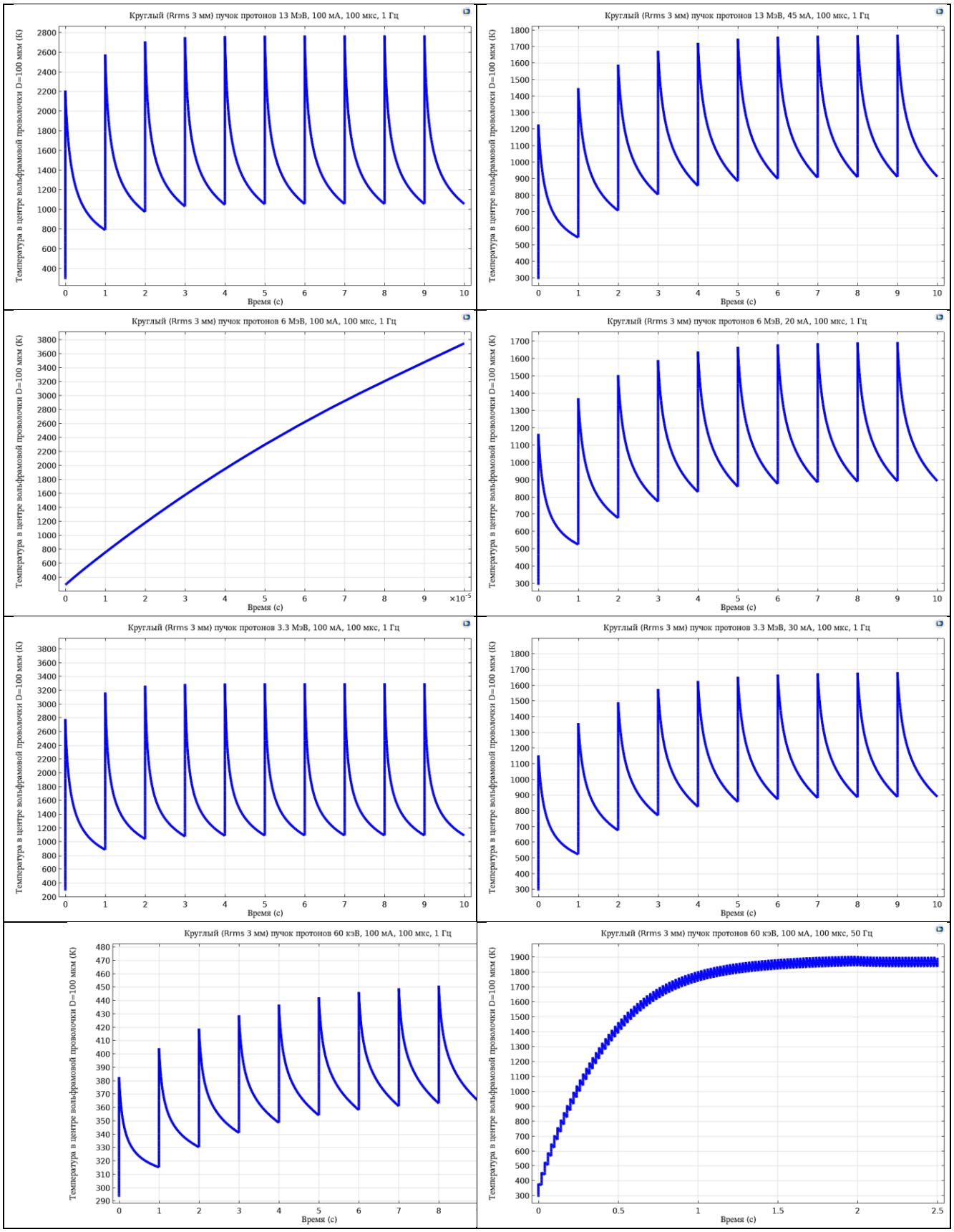
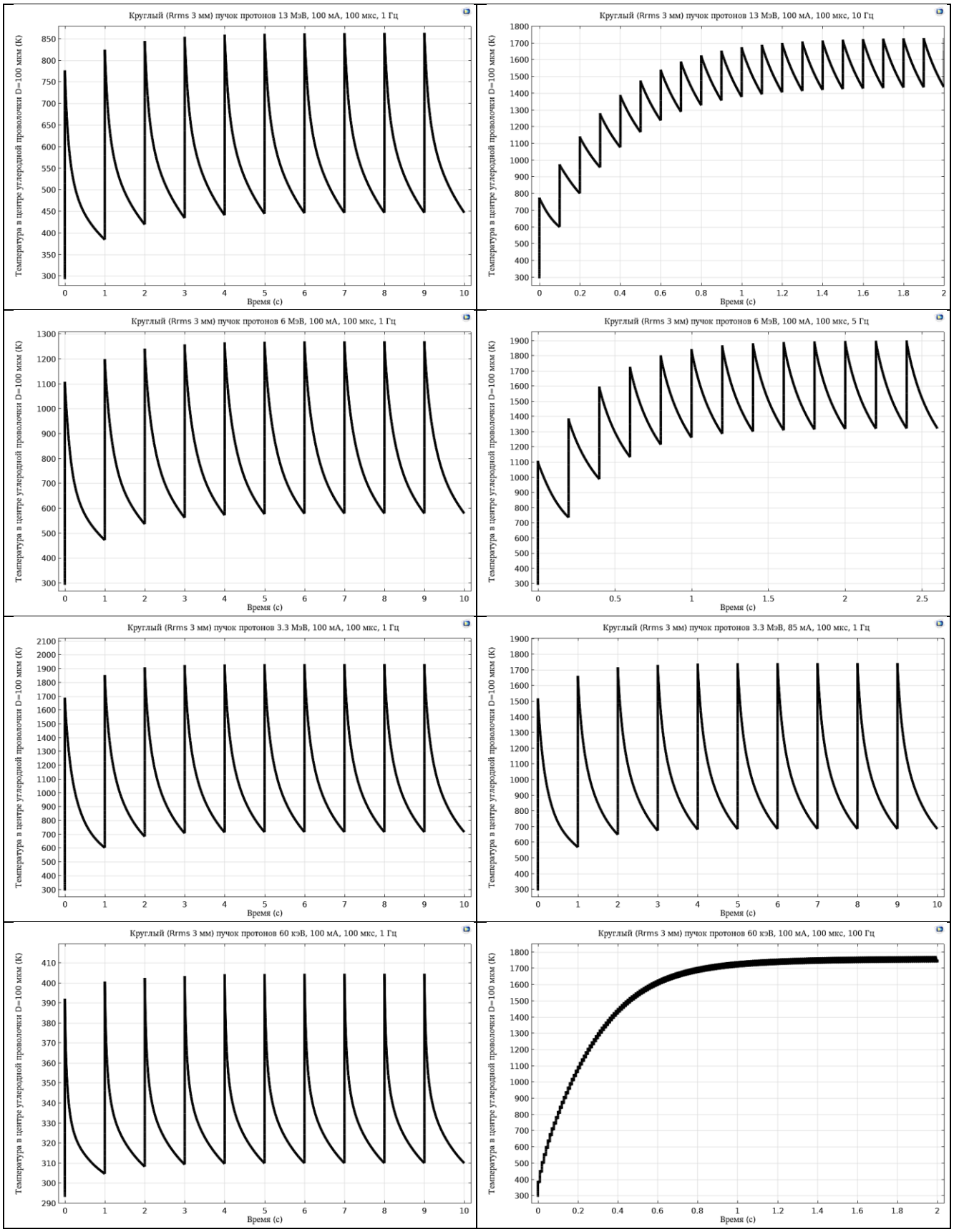


Таблица 2.2.2 – Пример расчетного нагрева углеродной проволоки диаметром 100 мкм под воздействием сильноточного пучка протонов.



Для расчета величины регистрируемого сигнала следует провести оценку максимального заряда, образующегося на проволочках. Доля пучка со среднеквадратичным размером σ, попадающая на центральную проволочку диаметром d равна:

$$p = \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-d/2}^{d/2} \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2})}. \quad (2.2.2)$$

Например, при среднеквадратичном размере пучка 1 мм и диаметре проволочки 100 мкм $p = 0.04$.

Для начального расчета тока вторичных электронов от взаимодействия пучка с позолоченной проволокой можно воспользоваться значением коэффициента вторичной эмиссии для золота при облучении пучком протонов (Рисунок 2.2.6) [57].

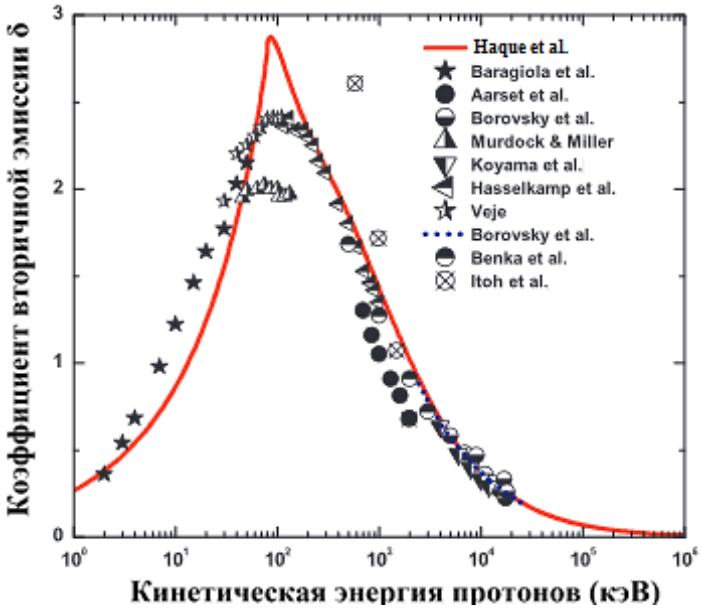


Рисунок 2.2.6 – Зависимость коэффициента ВЭЭ золота от энергии пучка протонов

Суммарный заряд вторичных электронов для пучка с импульсным током $I_{\text{пучка}}$ и длительностью τ оценивается по следующей формуле

$$Q_{\text{ВЭ}} = I_{\text{пучка}} \tau p \delta. \quad (2.2.3)$$

В низкоэнергетическом случае для оценки максимального заряда также необходимо учитывать заряд протонов, оставшихся в проволочке.

В высокоэнергетичном случае необходимо учитывать выбивание вторичных электронов при выходе протонов из проволочки. Для расчета заряда, образующегося при измерении ионного пучка, необходимо учесть изменение коэффициента вторичной эмиссии для ионов. Поскольку коэффициент пропорционален ионизационным потерям, которые в свою очередь можно оценить по формуле Бета-Блоха, то коэффициент вторичной эмиссии протонов $\delta_{\text{п}}$ связан с коэффициентом вторичной эмиссии для кислорода $\delta_{\text{к}}$ следующим соотношением

$$\frac{\delta_{\text{к}}}{\delta_{\text{п}}} = \frac{z^2}{A}, \tag{2.2.4}$$

где z – заряд и A – массовое число иона.

При прохождении ионов H^- через проволочку происходит несколько процессов: выбивание электронов вторичной эмиссии при пересечении частицами поверхности проволочки, обдирка электронов и формирование δ-электронов. В случае использования вольфрамовых проволочек отрицательные ионы водорода с энергией, например, меньше 50 МэВ полностью обдираются после прохождения 3 мкм вольфрама.

В таком случае каждый попавший на проволочку ион создает заряд

$$Q = \delta_{\text{вх}} + \delta_{\text{вых}}\eta + (1 - \eta) - 2, \tag{2.2.5}$$

где $\delta_{\text{вх}}$ и $\delta_{\text{вых}}$ – коэффициенты вторичной эмиссии на входе и выходе частицы из проволочки, η – доля прошедших насквозь протонов.

В случае использования запирающего напряжения вторичная эмиссия отсутствует и заряд равен $Q = -(1 + \eta)$. В проволочке диаметром 100 мкм частицы пучка полностью останавливаются при начальной энергии ~7 МэВ. Тогда $Q = -1$ при энергии меньше 6 МэВ и $Q = -2$ для энергии больше 7 МэВ. Суммарный заряд в проволочке для пучка с импульсным током $I_{\text{пучка}}$ и длительностью τ оценивается по следующей формуле:

$$Q_{\text{пров}} = I_{\text{пучка}}\tau p Q. \tag{2.2.6}$$

Помимо всех вышеописанных эффектов, часть электронов обдирки вылетает из проволочки из-за эффекта обратного рассеивания, при этом известно, что для энергий пучка меньше 50 МэВ и тяжелых металлов, таких как вольфрам, доля рассеянных электронов может составлять до 50 %.

В таблице 2.2.3 указаны величины образовавшегося заряда на проволочках для некоторых типичных параметров пучка протонов ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Таблица 2.2.3 – Заряд, образующийся на вольфрамовой проволоке диаметром 100 мкм от протонного пучка ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ

Энергия пучка, МэВ	Среднеквадратичный размер пучка, мм	Заряд вторичных электронов, пКл	Заряд остановившихся протонов, пКл	Суммарный заряд, пКл
0.04	2	300	200	500
0.82	1	600	400	1000
7.5	1	800	0	800

Также были проведены оценки заряда для ионов кислорода (таблица 2.2.4).

Таблица 2.2.4 – Заряд, образующийся на вольфрамовой проволоке диаметром 100 мкм от пучка O^{5+} ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ

Энергия пучка, МэВ/н	Среднеквадратичный размер пучка, мм	Заряд вторичных электронов, пКл	Заряд остановившихся ионов, пКл	Суммарный заряд, пКл
0.04	2	50	100	150
0.82	1	90	200	290
7.5	1	30	200	230

Параметры электроники

Двухканальная электроника проволочного сканера состоит из: ячейки интегратора с переключаемым коэффициентом усиления для сбора сигналов с проволочек, ячейки управления интегратором для согласования уровней сигналов и формирования последовательности управляющих импульсов для интегратора, а также ячейки аналогового мультиплексора для коммутации сигналов с интегратора и формирования сигнала калибровки. Схема переключения каналов по тактовому сигналу обеспечивает последовательное подключение каналов интегратора к выходному усилителю. Дифференциальный выходной сигнал передается в пультовую ускорителя по витой паре. Для работы как с током электронов вторичной эмиссии, так и с током первичных поглощаемых частиц на проволочки через разделительные конденсаторы подается потенциал до ±100 В. Все ячейки выполняются в экранированном каркасе и размещаются в 19”-крейте.

Итоговые эксплуатационные параметры разработанных сканеров

Исходя из результатов численного моделирования, разработанные сканеры (Рисунки 2.2.7, 2.2.8) в совокупности обладают следующими параметрами, комбинации которых необходимо предварительно численно оценивать, на основе допустимых импульсных и средних тепловых нагрузок на сигнальные проволочки:

- пространственное разрешение: не хуже 0.1 мм;
- рабочая амплитуда импульса тока: 0.01 ÷ 50 мА;
- рабочая длительность импульса тока: 0.5 ÷ 200 мкс;
- рабочая частота следования импульсов тока пучка: 1 ÷ 50 Гц;
- присоединительный стандарт: Conflat DN35, DN63, DN100;
- продольный размер для установки в ионопровод: ~70 мм;
- наличие потенциала смещения до ±100 В.

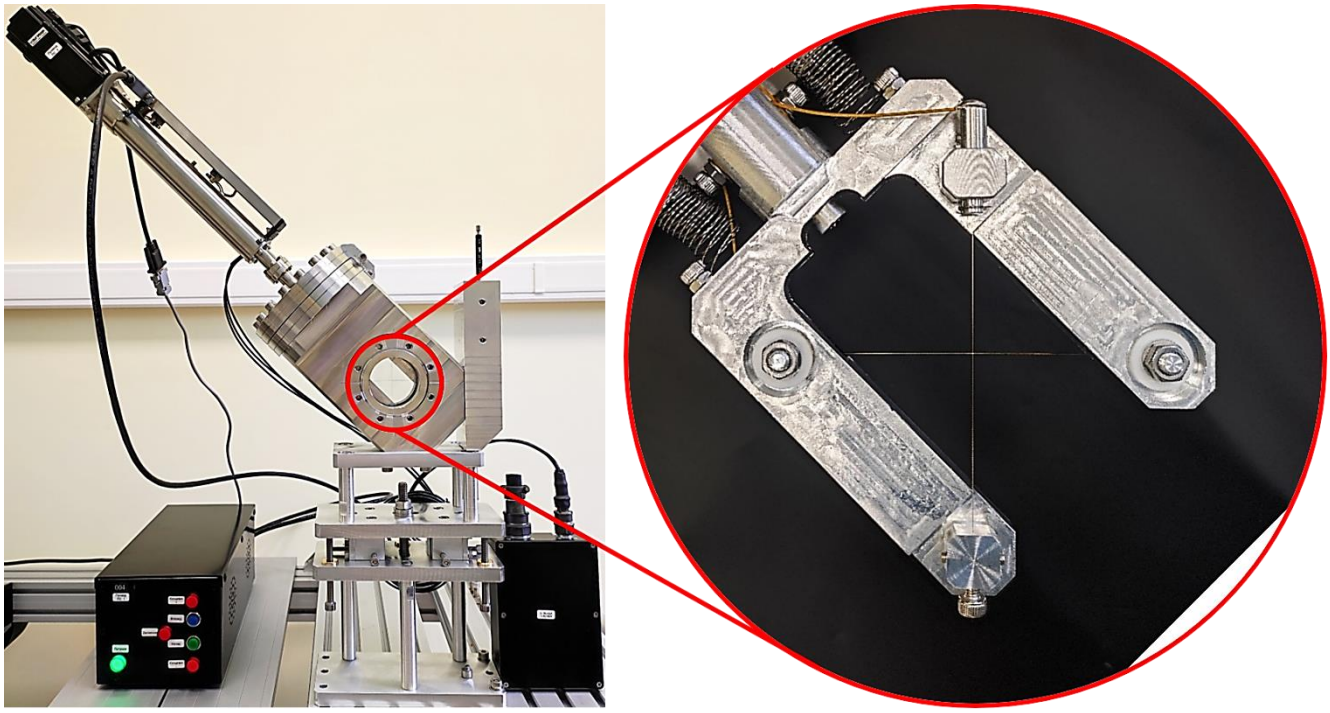


Рисунок 2.2.7 – Проволочный сканер в сборе с юстировочной подставкой, площадкой под геометки, контролллером шагового двигателя и предварительным усилителем

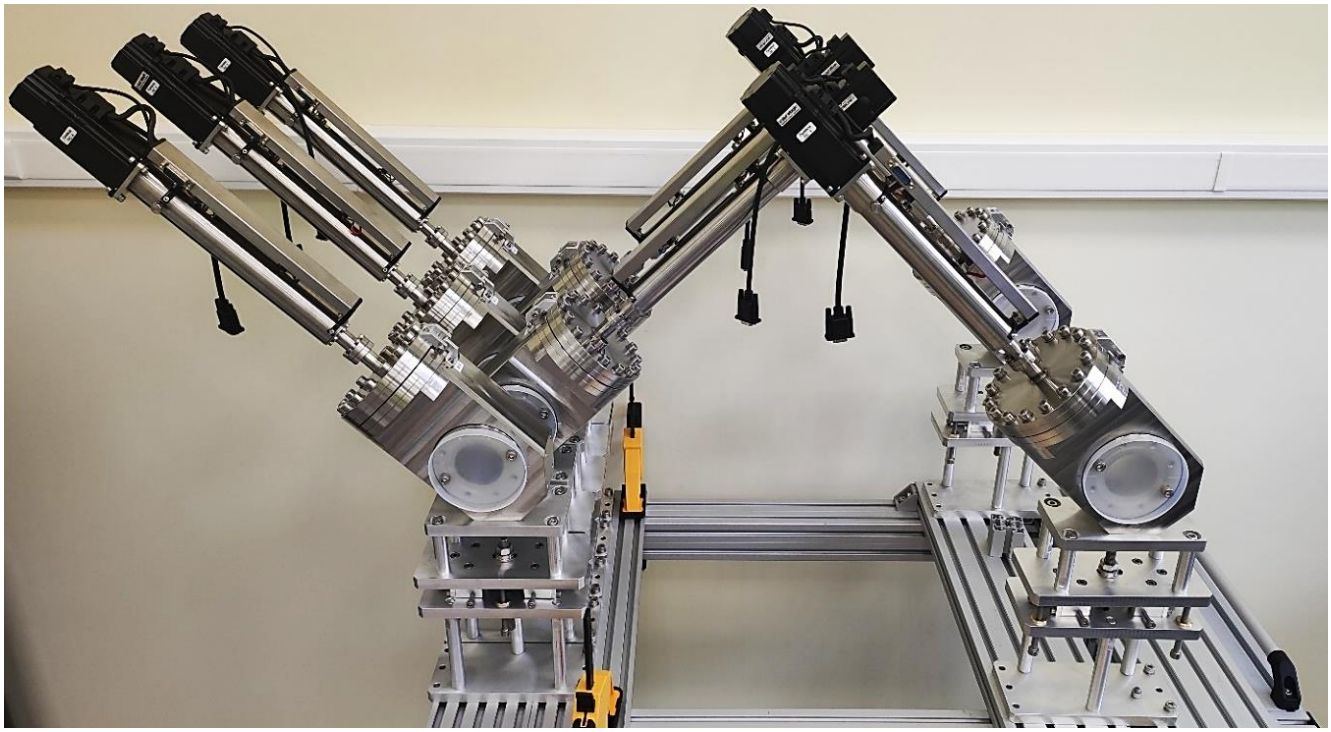


Рисунок 2.2.8 – Комплект изготовленных проволочных сканеров в сборе с юстировочными подставками для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ

Многопроволочные профилометры

Разработка и изготовление многопроволочных профилометров велись на основе конфигурации типа «сетка» и с использованием автоматизированных вакуумных вводов движения в соответствующих вакуумных боксах. Профилометры комплектуются многоканальной интегрирующей электроникой и ячейками управления собственного производства.

Конструктивные особенности

Для универсального использования профилометров были выбраны сетки с переменным шагом проволочек (Рисунок 2.2.9) диаметром 100 мкм из позолоченного вольфрама. Типичный шаг проволочек в центральной области составляет 1 мм, по краям – 2÷4 мм в зависимости от ожидаемых размеров пучка, таким образом обеспечивается необходимое разрешение в рабочем диапазоне размеров пучка при относительно большой общей апертуре датчика. Для уменьшения «кросс-токов» используются отрицательные потенциалы смещения на сигнальных проволочках в совокупности с положительными потенциалами на дополнительных проволочных или полосковых электродах.

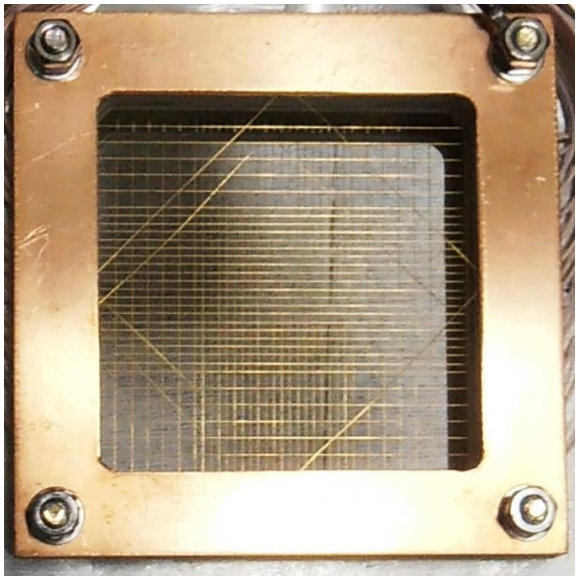


Рисунок 2.2.9 – Многопроволочный профилометр для HILAC ОИЯИ с переменным шагом проволочек и дополнительными электродами смещения

При низких тепловых нагрузках нет необходимости использования системы натяжения проволочек, и они могут быть распаяны бессвинцовым припоем на промышленно изготовленной двусторонней печатной плате, сделанной, например, на основе ламинатных материалов Rogers 4000-й серии (Рисунок 2.2.10), которые имеют низкое газовыделение и могут быть использованы в вакуумных системах с уровнем остаточного давления до 10^{-8} Торр. В случае необходимости удовлетворения более высоких вакуумных требований возможно изготовление печатных плат на керамических (Al_2O_3) подложках.

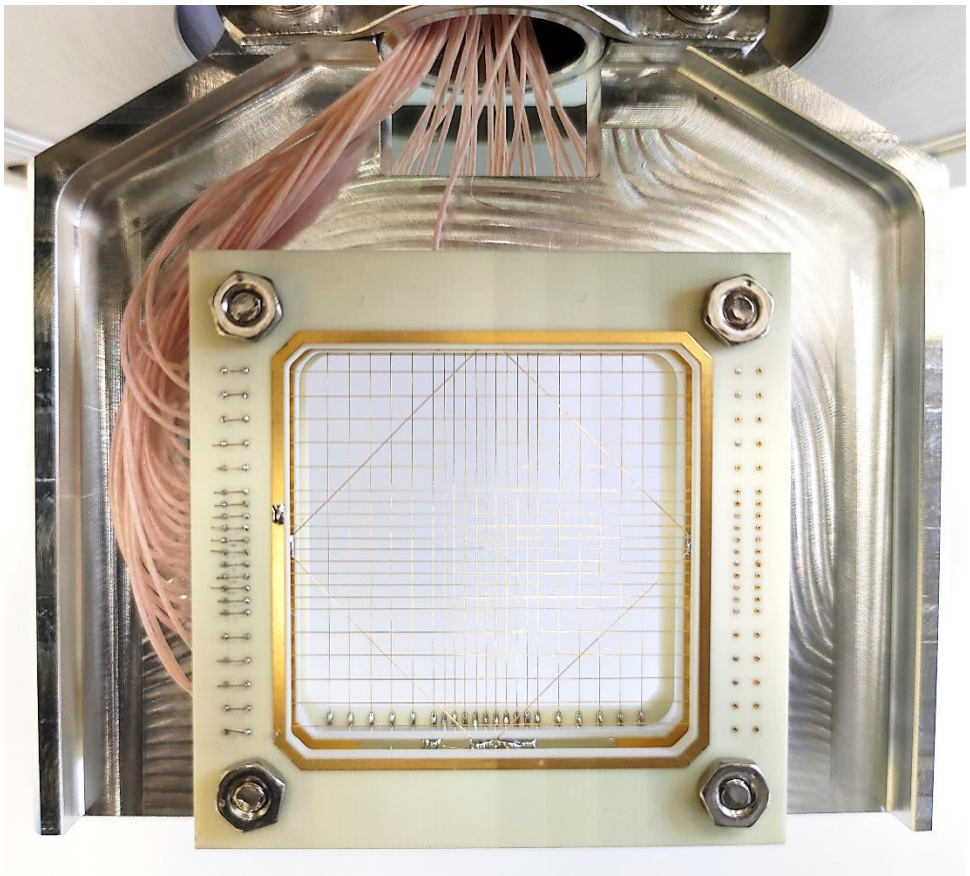


Рисунок 2.2.10 – Многопроволочный профилометр для ЛУ ИЯИ РАН на основе рамок в виде печатных плат из материала Rogers RO4003C

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик

Для многопроволочных профилометров оценки максимального тока вторичных электронов и расчеты тепловых нагрузок совпадают с оценками и расчетами для проволочного сканера.

Расчеты прозрачности сетки для анализируемого пучка проводятся в предположении, что частицы, попавшие на проволочку, считаются потерянными. В этом случае прозрачность сетки из проволочек диаметром 0.1 мм, расположенных с равномерным шагом 1 мм в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, составляет ~80% для среднеквадратичного размера пучка в диапазоне от 0.5 до 5 мм. При уменьшении диаметра проволочек до 50 мкм прозрачность сетки возрастает до ~90%.

Параметры электроники

Изготовленная типовая многоканальная электроника многопроволочного профилометра рассчитана на 50 каналов и состоит из: ячеек интегратора с переключаемым коэффициентом усиления для сбора сигналов с проволочек, ячейки управления интегратором для согласования уровней сигналов и формирования последовательности управляющих импульсов для интегратора, а также ячейки аналогового мультиплексора для коммутации сигналов с интегратора. Дифференциальный выходной сигнал передается в пультовую ускорителя по витой паре. Для увеличения чувствительности интегратора на проволочки через разделительные конденсаторы подается потенциал до ±300 В. Все ячейки выполняются в экранированном каркасе и размещаются в 19”-крейте.

Пучковые испытания профилометров и измерения профилей пучка

На рисунке 2.1.11 показан пример измерений профиля пучка протонов энергией 49 МэВ, импульсным током 0.5 мА и длительностью 20 мкс на изготовленном многопроволочном профилометре. На «сыром» сигнале видна особенность работы интегрирующей электроники – последовательность считываемых сигналов с отдельных каналов разделена тремя специальными сигналами с «высоким» уровнем, определяющими временны́е ворота интегрирования для автоматизированной обработки данных. Кроме того, электроника имеет возможность работы с отрицательными сигналами, что позволяет регистрировать пучки разных полярностей (Рисунок 2.2.12).

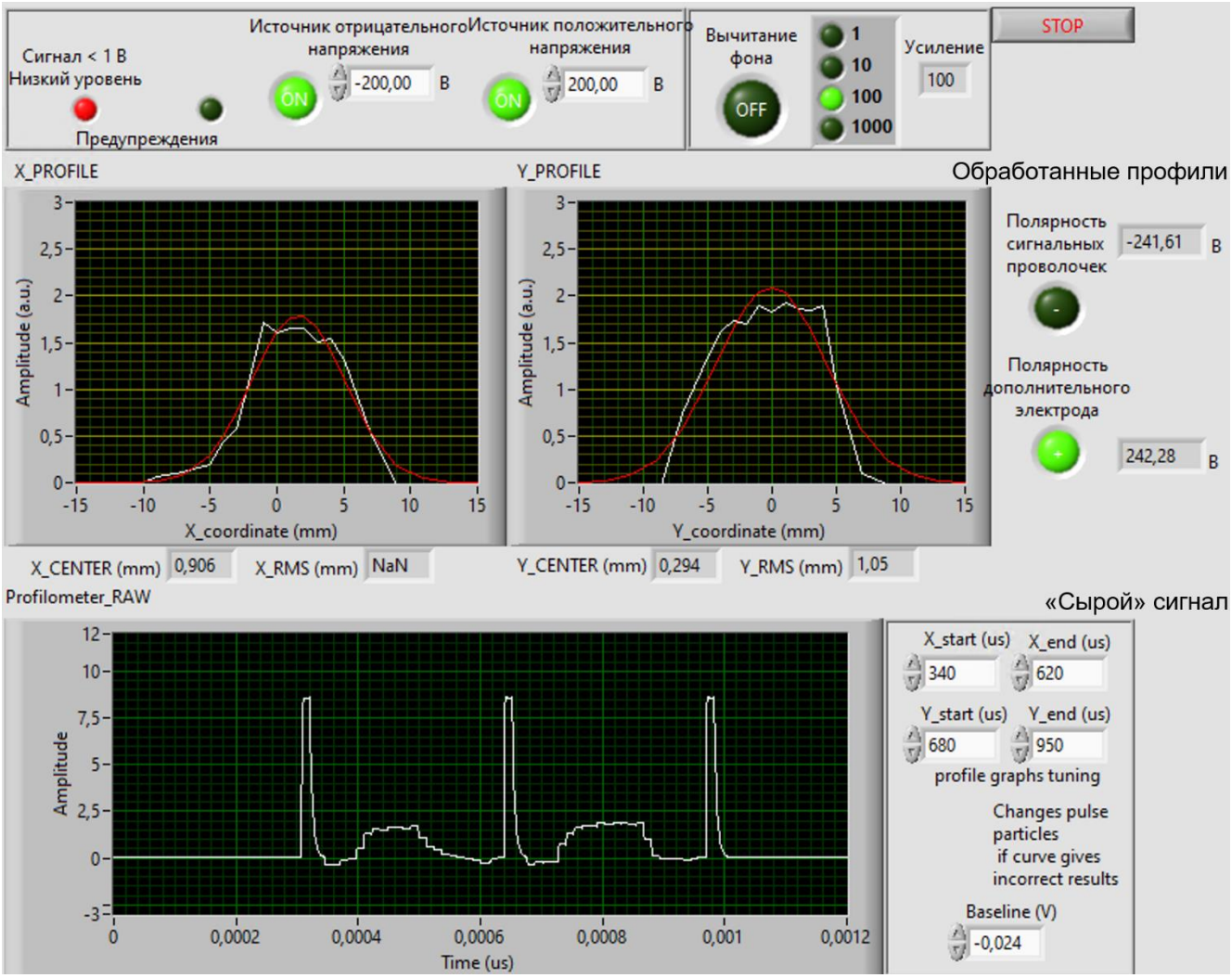


Рисунок 2.2.11 – Окно считывания и обработки данных многопроволочного профилометра на ЛУ ИЯИ РАН с примером измерения профиля пучка H^+

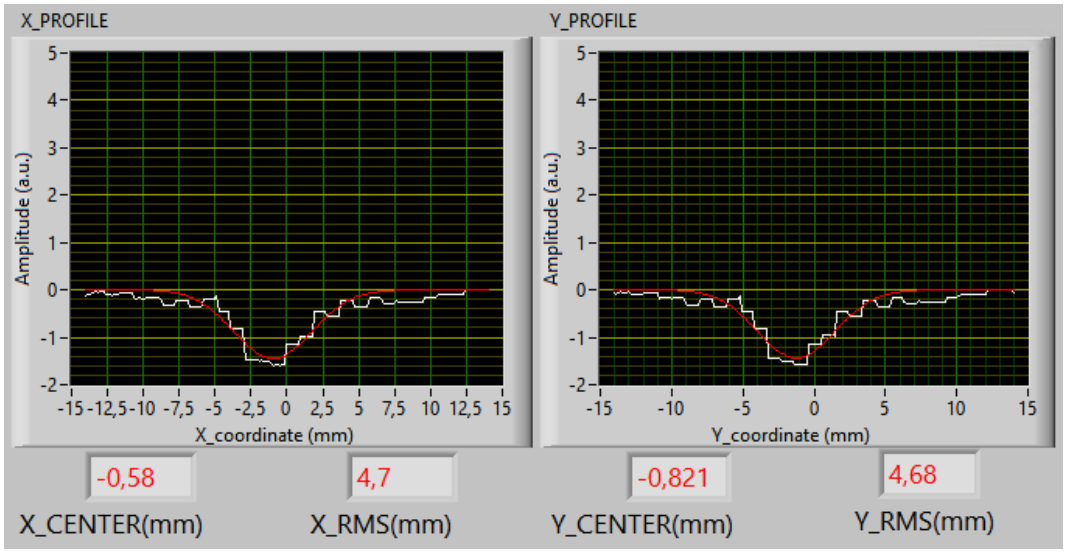


Рисунок 2.2.12 – Пример измерения профиля пучка H^- на ЛУ ИЯИ РАН

Итоговые эксплуатационные параметры разработанных профилометров

Исходя из результатов численного моделирования и проведенных испытаний, разработанные многопроволочные профилометры (Рисунок 2.2.13) в совокупности обладают следующими параметрами, комбинации которых необходимо предварительно численно оценивать, на основе допустимых импульсных и средних тепловых нагрузок на сигнальные проволочки:

- пространственное разрешение: не хуже 1 мм;
- рабочая амплитуда импульса тока: 0.01 ÷ 50 мА;
- рабочая длительность импульса тока: 0.5 ÷ 200 мкс;
- рабочая частота следования импульсов: 1 ÷ 50 Гц;
- присоединительный стандарт: Conflat DN35, DN63, DN100;
- продольный размер для установки в ионопровод: ~70 мм;
- наличие потенциала смещения для подавления ВЭЭ.

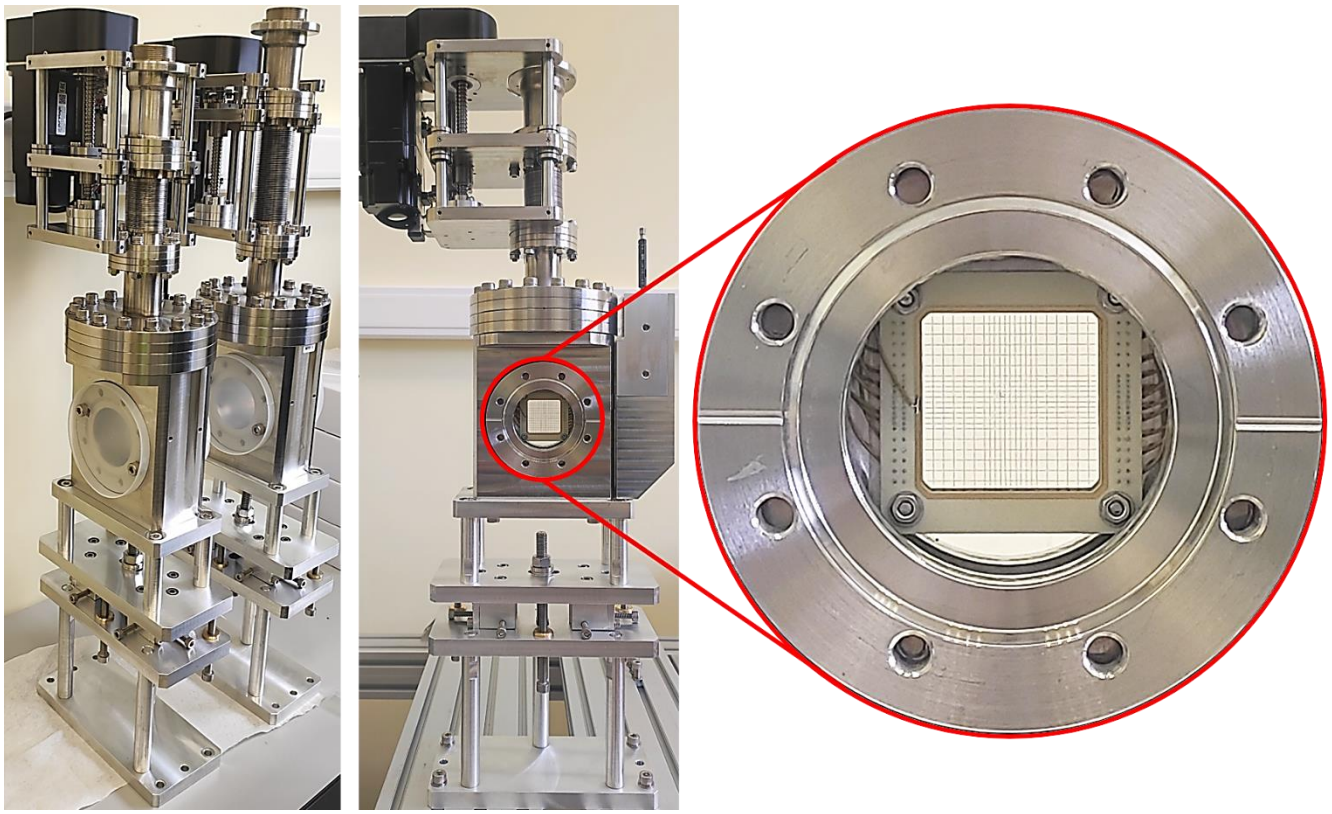


Рисунок 2.2.13 – Комплект многопроволочных профилометров для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ в сборе с вакуумным вводом движения и подставкой для юстировки

Ионизационные мониторы поперечного сечения

Разработка и изготовление ИМПС производились с использованием электронно-оптического преобразователя на основе МКП и люминесцентного экрана, изображение с которого регистрируется видеокамерой.

Конструктивные особенности

Для создания квазиоднородных электростатических полей извлекающего и анализирующего конденсаторов с неоднородностью <1% необходимо предусмотреть корректирующие электроды. Щели шириной ~ 0.5 мм в пластинах экстрактора и анализатора выполняются методом электроэрозии, что обеспечивает точность их геометрии.

Опыт эксплуатации ИМПС на ускорителе ИЯИ РАН [18, 26, 41] показывает, что оптимальным вариантом видеокамеры для регистрации изображения на люминофоре электронно-оптического преобразователя (ЭОП) является камера с ПЗС-сенсором, работающая в стандарте GigE Vision в совокупности со стандартными промышленными объективами машинного зрения. Для случая высокоинтенсивных пучков с энергией более нескольких десятков МэВ следует организовать специальную радиационную защиту ПЗС-камеры. Например, используя зеркально-линзовый тракт, передать изображение люминофора на камеру, расположенную за основной бетонной защитой туннеля ускорителя.

Для защиты от внешних магнитных полей, в случае размещения ИМПС вблизи квадрупольных линз или поворотных магнитов с большими величинами краевых полей, необходимо использование магнитной защиты, по аналогии с внешним магнитным экраном ИДТ, однако для ИМПС имеет смысл изменить конфигурацию защиты, и использовать листы низконикелевого пермаллоя марки 50Н ($\mu \sim 10^4 \div 4 \cdot 10^5$, $B_{max} \sim 1.5$ Тл) толщиной 1÷2 мм.

На рисунке 2.2.14 показана оптимизированная трехмерная модель ИМПС на основе стандартного conflat-куба CF-150.

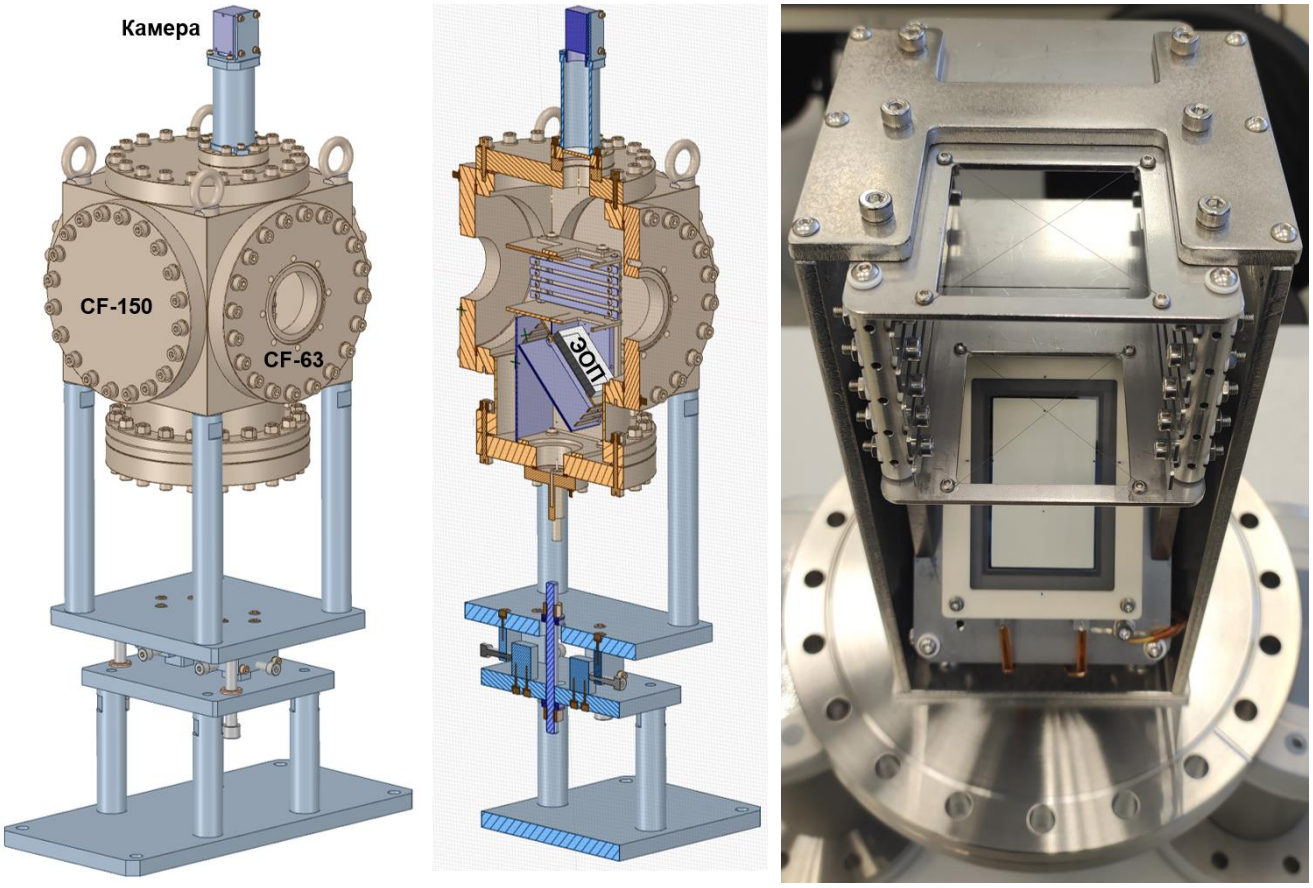


Рисунок 2.2.14 – Разработанная трехмерная модель ИМПС на основе куба CF-150 и фотография внутренней детектирующей сборки для испытаний на ЛУ ИЯИ РАН

Масштабирование устройства под разные типы присоединительных фланцев в данном случае достигается за счёт замены фланцев-адаптеров CF-150 – CF-63 или CF-150 – CF-35. Отличительной чертой предлагаемой конфигурации ИМПС является возможность получения двумерных поперечных сечений за один импульс пучка с минимизированными погрешностями за счёт использования усовершенствованной системы выравнивания электростатических полей на основе корректирующих электродов. Для выполнения функций электронно-оптического преобразователя выбран детектор DV43x63-10P производства фирмы «Баспик» (Владикавказ, Россия) на основе шевронной сборки микроканальных пластин с общим усилением до $1 \cdot 10^7$ и люминесцентного экрана, изготовленного из люминофора К-67 на стекле марки К-8.

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик

Интенсивность свечения люминесцентного экрана ЭОП определяется количеством вторичных ионов, образующихся в течение импульса тока пучка, которое можно оценить по формуле:

$$N_{ион} = \frac{\rho_0}{\varepsilon_{ион}} \frac{P}{P_0} L_{щель} \frac{dE}{dz} N_{пучок}\,, \qquad (2.2.7)$$

где ρ_0 – плотность остаточного газа при давлении P_0, P – давление остаточного газа, $\varepsilon_{ион}$ – энергия ионизации молекул остаточного газа, dE/dZ – удельные ионизационные потери, $L_{щель}$ – ширина щели экстрактора, $N_{пучок}$ – число частиц в импульсе тока пучка.

Из-за воздействия электростатического поля экстрактора на выходе из монитора частицы пучка движутся под углом α к первоначальному направлению движения:

$$tg\alpha = \frac{q}{m} \frac{L}{(\beta c)^2} E \qquad (2.2.8)$$

На рисунке 2.2.15 показана зависимость углов отклонения пучков в разработанном ИМПС. Например, в ИМПС для пучков ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ энергией 7.5 МэВ/нуклон, при напряженности извлекающего поля E = 1.5 кВ/см и длине электродов L = 120 мм, значения углов лежат в диапазоне 0.4÷1.2 мрад.

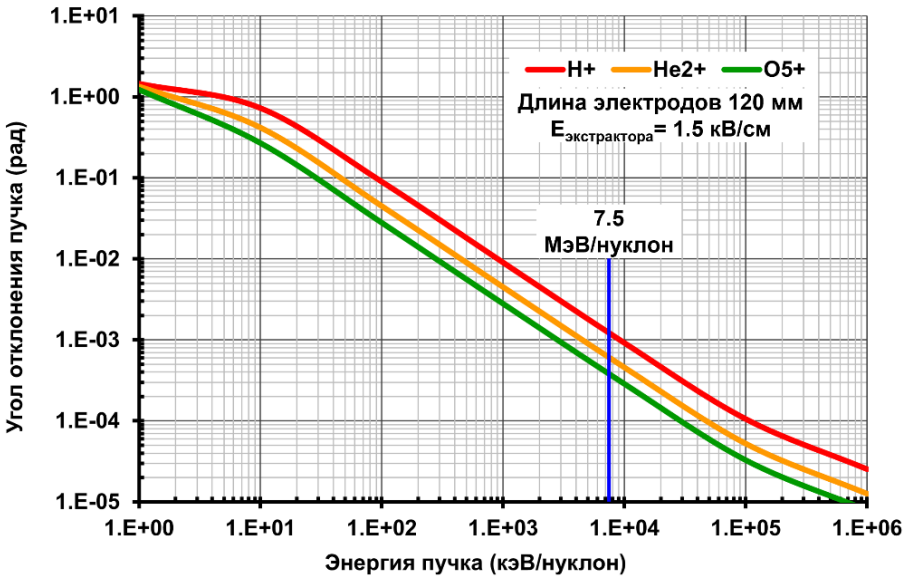


Рисунок 2.2.15 – Расчетная зависимость угла отклонения от энергии пучка в ИМПС

Параметры электроники

Основой электроники ИМПС, помимо высоковольтных источников, является стандартная видеокамера машинного зрения стандарта GigE, которая может быть напрямую подключена к любому компьютеру или введена в локальную сеть через сетевой коммутатор. В качестве оптимального варианта видеокамеры для регистрации изображения на люминофоре ЭОП выбрана монохромная камера с ПЗС-сенсором и глобальным затвором производства фирмы ContrasTech (Китай), работающая в стандарте GigE Vision в совокупности со стандартным промышленным объективом.

Обработка данных ведется в ПО на основе платформы LabVIEW, позволяющим осуществлять управление параметрами высоковольтных источников и видеокамеры, а также проводить математическую обработку регистрируемых поперечных сечений для получения параметров поперечных профилей и положения центра тяжести пучка.

Пучковые испытания ИМПС и измерения параметров пучка

Типичные результаты измерений поперечного сечения ионных пучков с различными параметрами (энергия, ток, длительность импульса) при давлении остаточного газа в ионопроводе ЛУ ИЯИ РАН ~$5\cdot10^{-7}$ Торр показаны на рисунке 2.2.16. Возможности ИМПС и разработанного для обработки изображений программного обеспечения на основе LabVIEW позволяют использовать ИМПС для диагностики как протонных пучков, так и пучков отрицательных ионов водорода во всём диапазоне параметров ЛУ ИЯИ РАН, в том числе для малых импульсных токов (десятки микроампер) для конвенциональной протонной терапии и коротких длительностей импульса тока (сотни наносекунд) для времяпролетных нейтронных экспериментов [12].

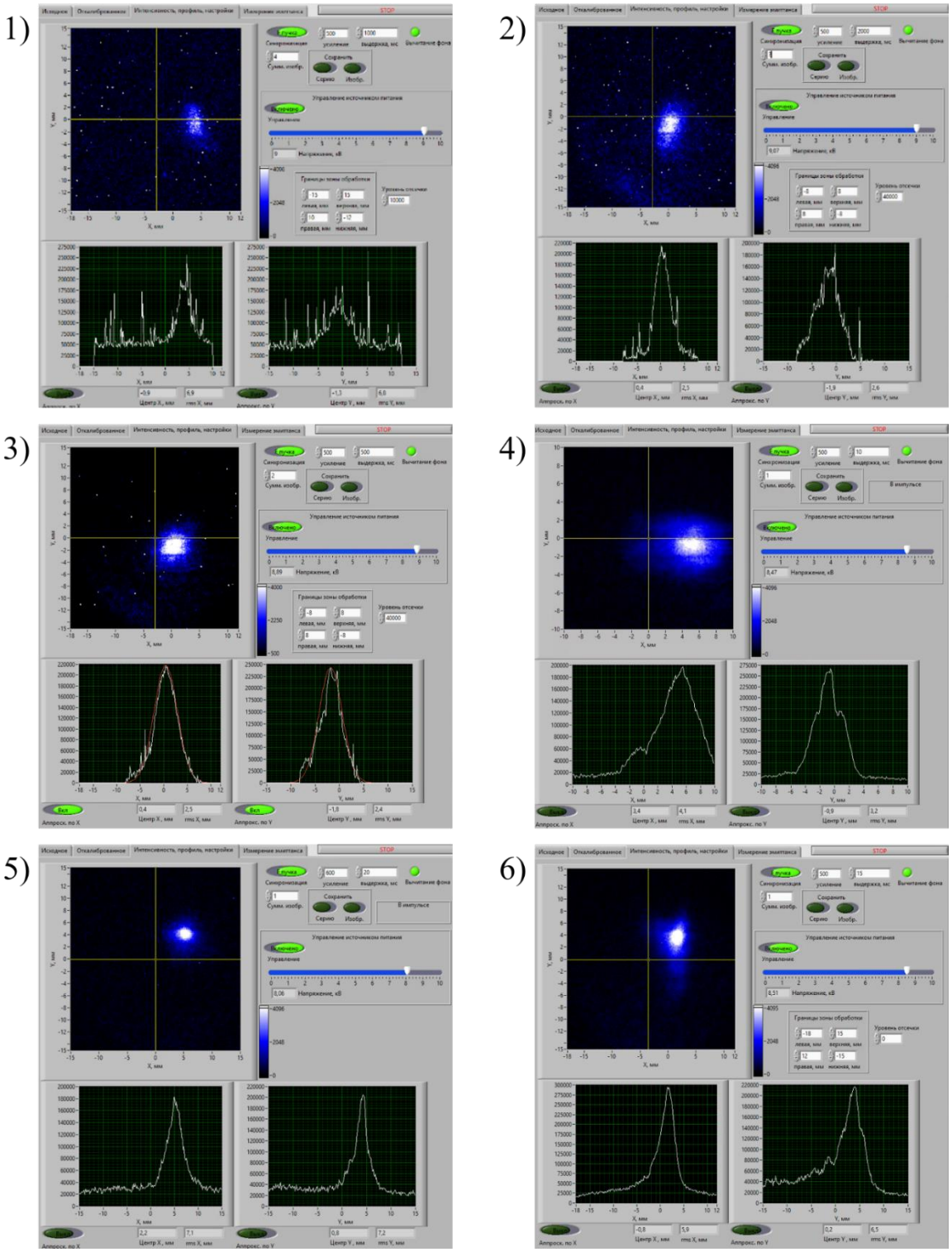


Рисунок 2.2.16 – Измеренные ИМПС поперечные сечения и полученные из них профили пучков с разными параметрами (энергия, ток, длительность импульса): 1 – H^+, 158 МэВ, 0.012 мА, 20 мкс; 2 – H^+, 267 МэВ, 0.5 мА, 0.3 мкс; 3 – H^+, 267 МэВ, 10 мА, 0.3 мкс; 4 – H^+, 247 МэВ, 5 мА, 175 мкс; 5 – H^+, 305 МэВ, 6 мА, 105 мкс; 6 – H^-, 94 МэВ, 2 мА, 96 мкс

В целом ионизационный монитор поперечного сечения пучка представляется удобным инструментом для наблюдений и измерений в режиме реального времени поперечных параметров пучков в линейных ускорителях ионов, являясь многопараметрическим детектором со следующими реализованными преимуществами:

1. Высокая информативность измерений, так как из изображения поперечного сечения пучка может быть извлечено положение центра тяжести пучка и любое количество профилей пучка под любым углом.
2. Полная прозрачность измерений, так как только остаточный газ вакуумной камеры является детектирующей средой.
3. Широкий диапазон измерений по току пучка за счет использования ионной компоненты ионизированного остаточного газа, которая меньше, чем электронная компонента, подвержена влиянию пространственного заряда пучка.
4. Универсальность измерений с точки зрения типа частиц и широкий диапазон по энергиям.
5. Высокое быстродействие ИМПС, не уступающее люминесцентным экранам.
6. Отсутствие необходимости передачи движения в вакуум ионопровода.

Кроме того, так как ионизационный монитор может выступать в роли профилометра, то полученные из поперечного сечения профили пучка можно использовать для методики восстановления эквивалентного фазового эллипса методом квадрупольного сканирования, а применение методов томографии позволяет таким образом осуществлять полноценную неразрушающую диагностику поперечного эмиттанса пучка с восстановлением реального двумерного распределения частиц на поперечных фазовых плоскостях [37, 40].

Суммарная погрешность измерений ИМПС складывается из нескольких разных факторов: размеров щелей, влияния теплового движения ионов, неоднородностей электростатических полей экстрактора и анализатора, параметров ЭОП и ПЗС-матрицы, а также влияния пространственного заряда пучка – итоговая оценка среднеквадратичной погрешности измерений профилей пучка равна ~250 мкм.

Итоговые эксплуатационные параметры разработанных ИМПС

Исходя из результатов расчетов, моделирования и проведенных испытаний, а также опыта эксплуатации подобных устройств, разработанные ионизационные мониторы (Рисунок 2.2.17) на основе ЭОП с микроканальными пластинами и стандартных камер машинного зрения обладают следующими рабочими характеристиками:

- пространственное разрешение: не хуже 1 мм;
- рабочая амплитуда импульса тока: 0.01 ÷ 100 мА;
- рабочая длительность импульса тока: 0.1 ÷ 200 мкс;
- рабочая частота следования импульсов: 1 ÷ 100 Гц;
- рабочая энергия пучка: > 10 МэВ/нуклон;
- присоединительный стандарт: Conflat DN35, DN63, DN100;
- продольный размер для установки в ионопровод: ~250 мм;
- рабочее давление остаточного газа в ионопроводе: от 10^{-5} до 10^{-9} Торр.

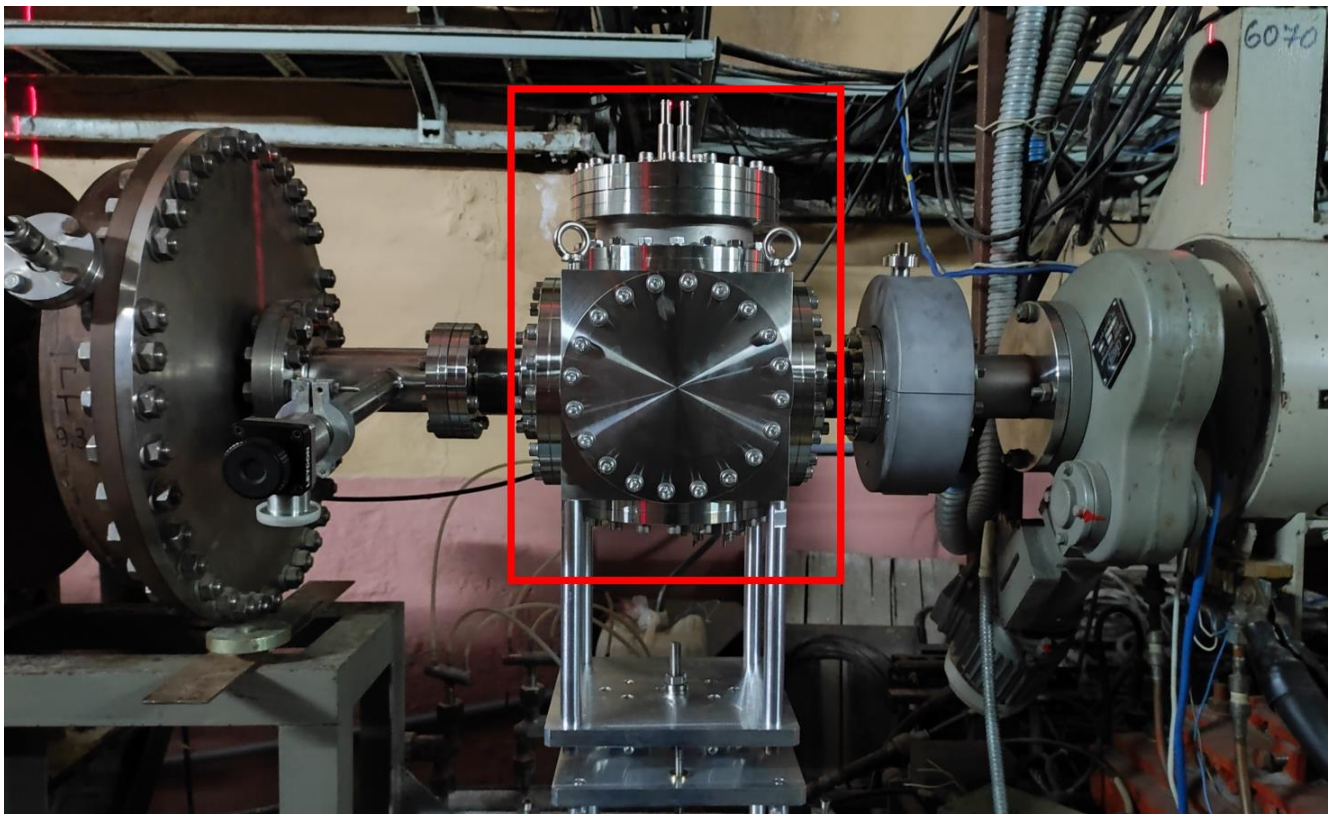


Рисунок 2.2.16 – Изготовленный ИМПС (в красной рамке), установленный на участке 160 МэВ ЛУ ИЯИ РАН

Флуоресцентные мониторы

Хорошо известно, что на участках между ионным источником и линейным ускорителем сильное влияние на динамику ионных пучков энергией до 100 кэВ оказывает их собственный пространственный заряд. Однако это влияние уменьшается, если происходит компенсация заряда за счёт ионизации пучком молекул остаточного газа: электроны, возникающие при ионизации, нейтрализуют положительный пространственный заряд ионного пучка.

Эффект компенсации возможен в том случае, если при транспортировке и корректировке пучка не используются сильные электрические поля, т.е. в магнитооптических каналах транспортировки. Например, в работах [4, 6, 39] при участии автора была определена степень компенсации пространственного заряда пучка протонов ИЯИ РАН с импульсным током 60 мА, энергией 400 кэВ и длительностью импульса 200 мкс в магнитооптическом канале транспортировки с уровнем вакуума $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ Торр. Измеренная степень компенсации менялась в течение токового импульса в пределах 0.7÷0.82, однако моделирование динамики пучка в канале показало, что для данной энергии изменение степени компенсации в таких пределах не оказывает заметного влияния на изменение фазового портрета пучка.

Принципиальным отличием флуоресцентных мониторов (ФЛУМ) от любых других устройств диагностики поперечного профиля является возможность проведения непрерывных, полностью невозмущающих измерений, при которых, в том числе не меняется степень компенсации пространственного заряда высокоинтенсивного низкоэнергетического пучка, что критически важно для сохранения правильной динамики пучка как вдоль канала инжекции в ЛУ, так и на входе в RFQ.

Разработка и изготовление флуоресцентных мониторов осуществлялись для проверки возможности использования относительно простого, дешевого и компактного способа диагностики на основе стандартных камер машинного зрения, без использования напуска газа и усилителей изображения в типичных условиях низкоэнергетического канала транспортировки линейного ускорителя ионов.

Конструктивные особенности

Разработка флуоресцентных мониторов проводилась с учётом того, что ФЛУМ на основе стандартных камер машинного зрения наиболее востребованы на низкоэнергетических каналах инжекции сильноточных ЛУ, где достаточно велика интенсивность свечения остаточного газа, и при этом, как правило, ограничено место для установки какого-либо диагностического оборудования. На рисунке 2.2.17 показаны разработанные трехмерные модели ФЛУМ, масштабированные для двух значений апертуры CF-63 и CF-35.

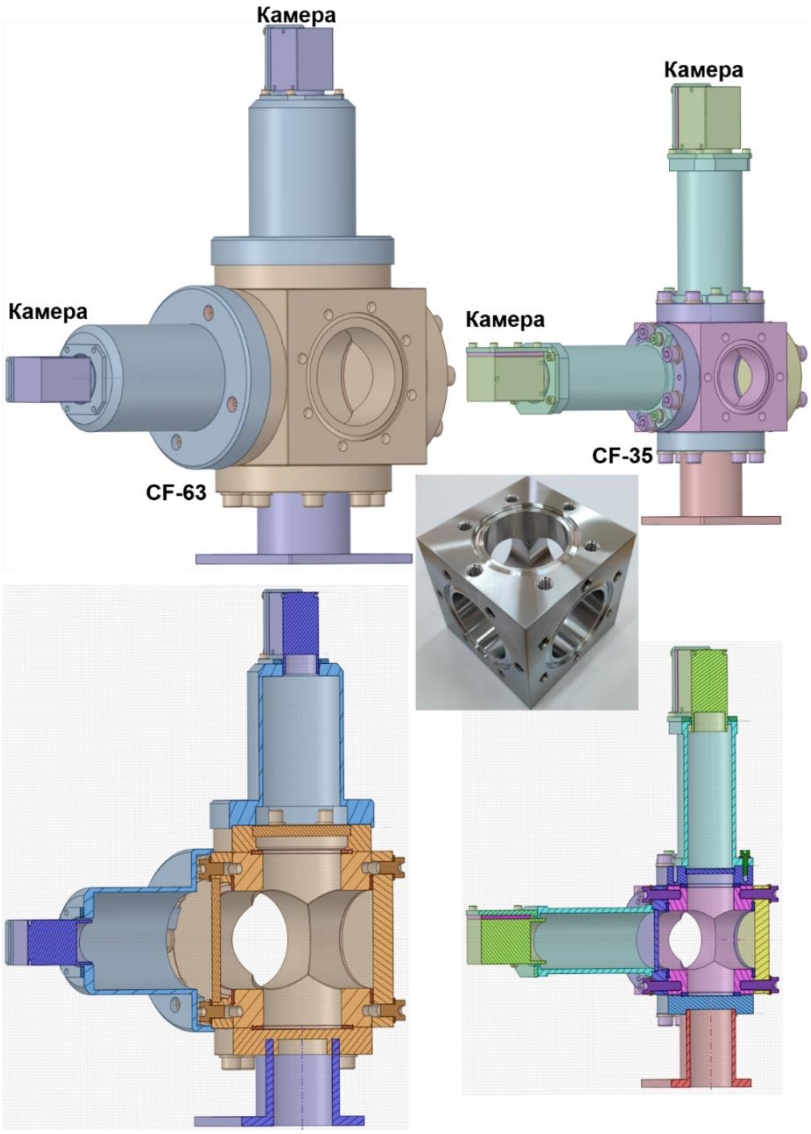


Рисунок 2.2.17 – Разработанные трехмерные модели ФЛУМ на основе стандартных кубов CF-63 и CF-35 и ПЗС-камер машинного зрения

Пучковые испытания ФЛУМ и измерения параметров пучка

Для проверки отдельных технических и конструкторских решений в условиях низкоэнергетического канала инжекции пучка протонов ЛУ ИЯИ РАН был изготовлен опытный образец ФЛУМ на основе существующей секции ионопровода, без использования CF-куба (Рисунок 2.2.18).

ФЛУМ [14] был установлен на канале инжекции для измерения профилей протонных пучков энергией 400 КэВ при рабочем давлении ~ $10^{-7} \div 10^{-6}$ мбар и состоял из вакуумной камеры апертурой 50 мм с двумя окнами стандарта CF35 из боросиликатного стекла и двух черно-белых ПЗС-камер машинного зрения.

Для минимизации паразитных переотражений внутренние поверхности вакуумной камеры и патрубков были покрыты слоем лака на основе мелкодисперсного графита, растворенного в изопропиловом спирте: спирт испарялся после распыления и прогрева, оставляя на поверхности тонкий матовый токопроводящий слой графита.

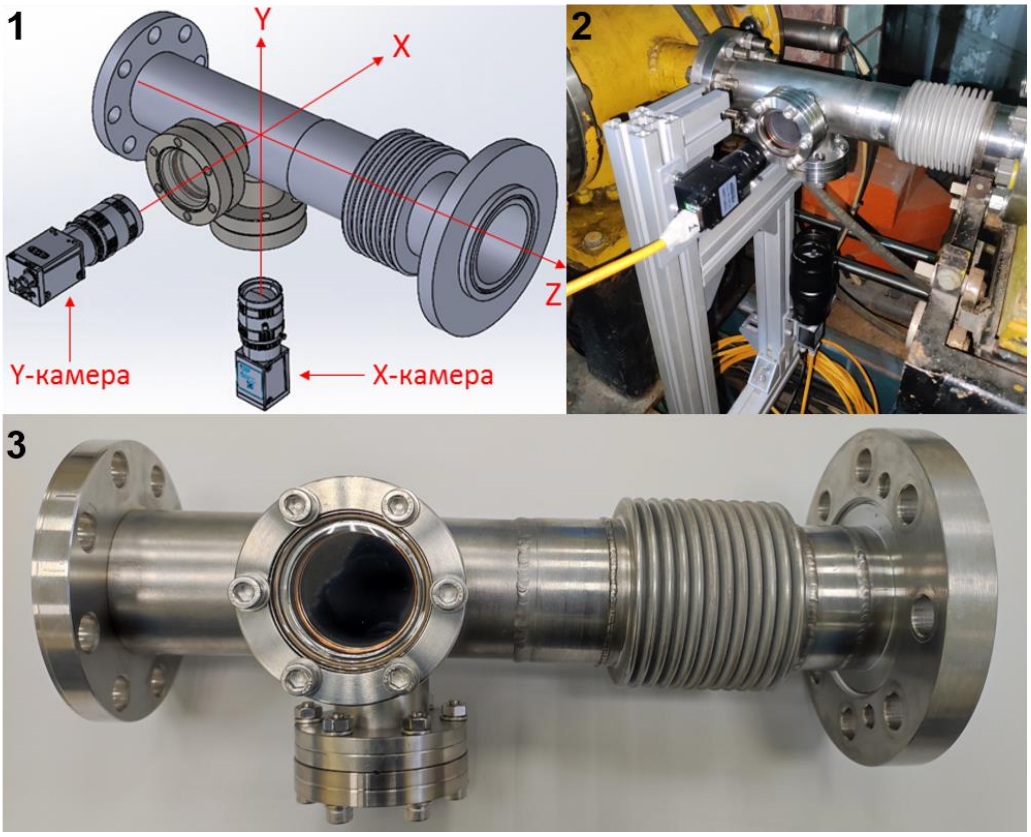


Рисунок 2.2.18 – 1. Трехмерная модель. 2–3. Фотографии изготовленного опытного образца ФЛУМ, установленного для пучковых испытаний

Камеры для подавления внешней засветки оборачивались черной матовой фольгой, а также закрывались 5 мм свинцовым колпаком для уменьшения рентгеновского фона от инжектора и защиты от радиационных повреждений.

Для регистрации и обработки изображений в режиме реального времени была написана программа в среде LabVIEW, в которой строились проекции распределения интенсивности, а также вычислялись положение центра тяжести и среднеквадратичный размер профиля пучка [71].

На рисунке 2.2.19 показано окно программы сбора и обработки данных с типичным результатом измерений при следующих параметрах: энергия пучка 400 кэВ, импульсный ток 55 мА, длительность импульса на полувысоте 180 мкс, частота следования импульсов 50 Гц, экспозиция камеры 5 с, суммирование 3 кадров.

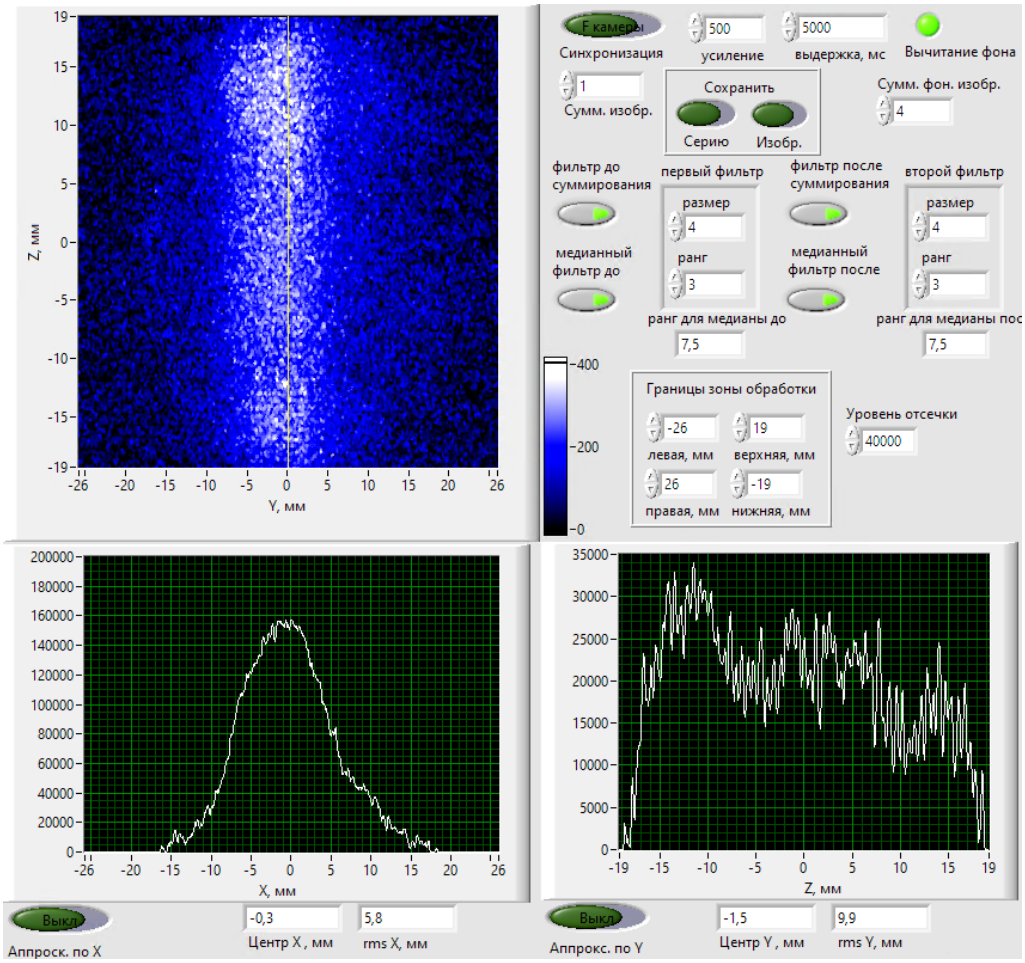


Рисунок 2.2.19 – Окно программы сбора и обработки данных ФЛУМ с типичным результатом измерений профиля пучка протонов по оси X

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик

Учитывая процентную долю каждой составляющей остаточного газа в канале инжекции, их спектры излучения, спектральную зависимость коэффициента пропускания боросиликатного стекла и спектральную чувствительность монохромных ПЗС-камер можно оценить спектральную эффективность регистрации. Пример такой оценки приведен на рисунке 2.2.20. Оттенки синего цвета на приведенных зарегистрированных изображениях пучка, по аналогии с ИМПС, используются исключительно для улучшения контрастности визуальных данных в рабочих программах и не имеют отношения к реальному спектру свечения.

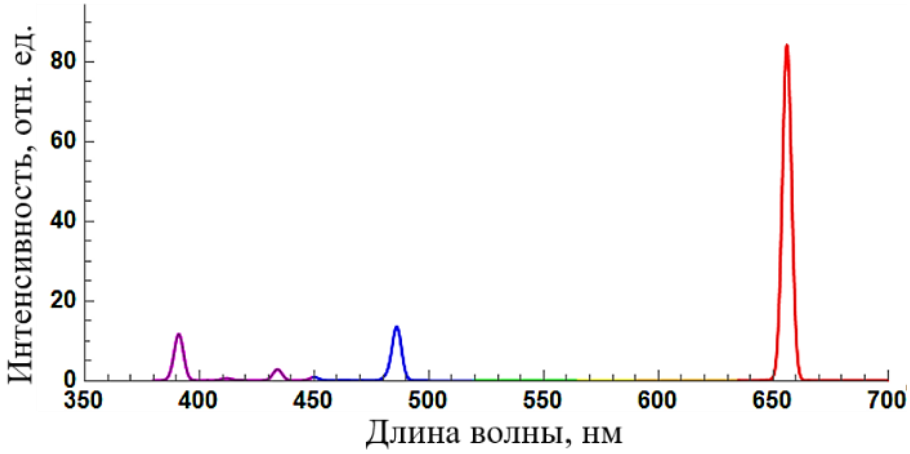


Рисунок 2.2.20 – Оценочная спектральная эффективность регистрации излучения.

Разрешение можно определить как минимальное расстояние между бесконечно тонкими пучками, при котором их изображения попадают в разные пиксели матрицы, что, например, соответствует ~90 мкм для использованных камер. Таким образом, основными ограничениями разрешения ФЛУМ являются конечный размер пикселя и глубина резкости изображаемого пространства (ГРИП): в случае, если пучки сдвигаются относительно фокальной плоскости, их изображения размываются, и разрешение можно оценить, как $R = \sqrt{{\delta_{\text{пк}}}^2 + {\delta_{\text{ГРИП}}}^2}$, где $\delta_{\text{пк}}$ – расстояние в фокальной плоскости, приходящееся на 1 пиксель матрицы (определяется расстоянием до пучка, параметрами объектива и ПЗС-матрицы), $\delta_{\text{ГРИП}}$ – размытие изображение, вызванное смещением пучка.

Расчетная величина разрешения испытанного ФЛУМ приведена на рисунке 2.2.21. Ограничивая допустимый размер размытия изображения одним пикселем, получаем разрешение $R = \sqrt{2}\,\delta_{\text{пк}} = 127$ мкм.

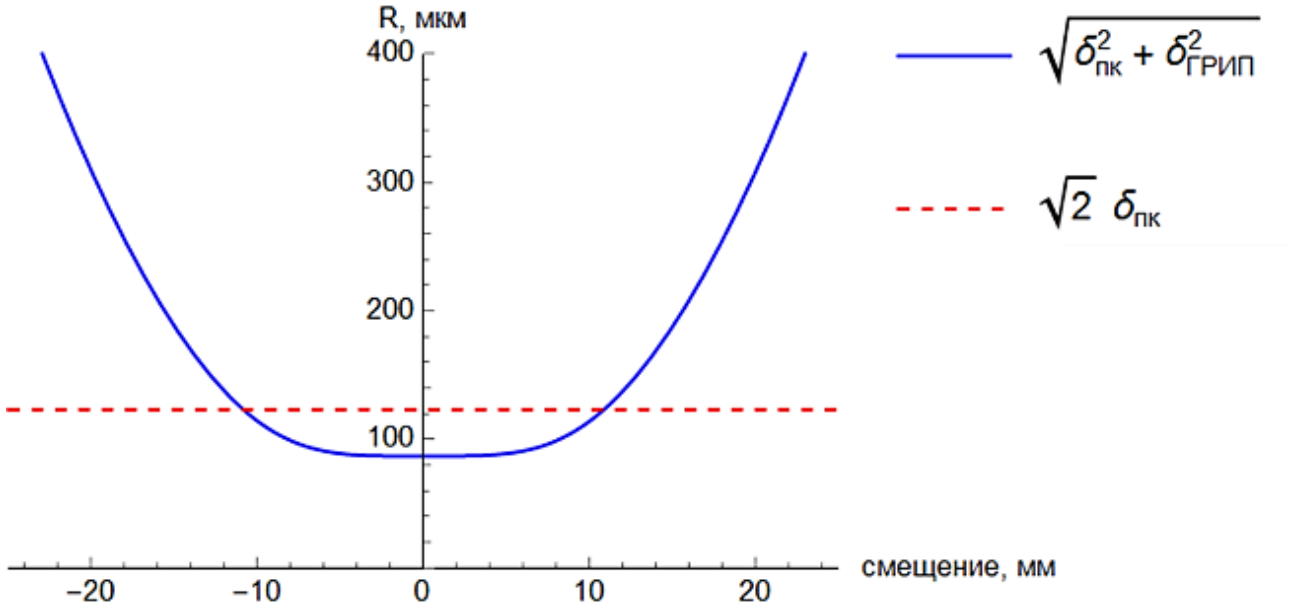


Рисунок 2.2.21 – Расчетное разрешение испытанного ФЛУМ

Точность ФЛУМ ограничена ошибками постобработки, смещением пучка от фокальной плоскости, тепловым движением атомов и молекул газа и размытием изображения пучка за счёт недостаточной глубины резкости и для используемой конфигурации ФЛУМ составляет ~10÷15% во всей рабочей апертуре. Пороговая чувствительность ФЛУМ определяется шумами ПЗС-матрицы, в частности вызванными её неравномерным прогревом, фоновой засветкой, горячими пикселями и паразитными переотражениями внутри вакуумной камеры. При смещении пучка относительно фокальной плоскости также меняется масштаб наблюдаемого изображения, что приводит к ошибке измерения размера пучка. Зависимость масштаба (μ) от смещения изображения относительно фокальной плоскости приведена на рисунке 2.2.22. При смещении оси пучка на 10 мм от фокальной плоскости относительное изменение масштаба составляет Δμ ~4%.

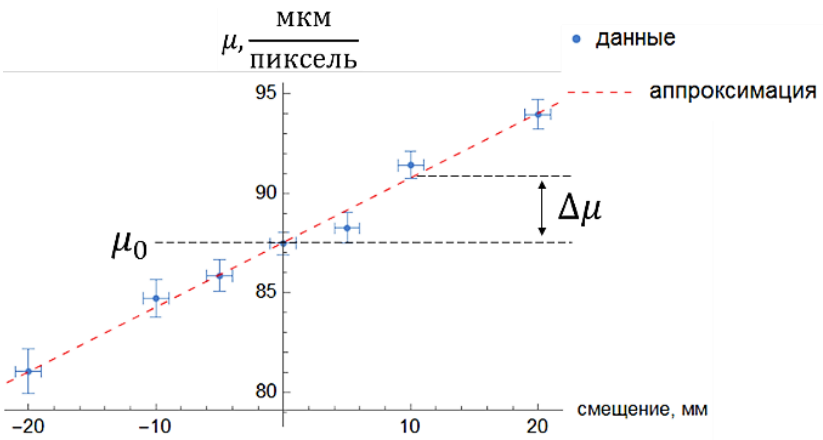


Рисунок 2.2.22 – Масштаб изображения в зависимости от смещения относительно фокальной плоскости объектива камеры ФЛУМ

Параметры электроники

Основой электроники ФЛУМ, как и в случае ИМПС, является стандартная видеокамера машинного зрения стандарта GigE. Однако для уменьшения шумов ПЗС-матрицы возможно использование камер как с внешним охлаждением, так и моделей с внутренним охлаждением матрицы на основе элемента Пельтье. Также следует выбирать камеры с возможностью внешней синхронизации так, чтобы, частота открытия затвора была кратна частоте следования сгустков пучка, что позволит уменьшить тепловой шум в пикселях матрицы.

Итоговые эксплуатационные параметры разработанных ФЛУМ

Исходя из результатов проведенных испытаний, разработанные флуоресцентные мониторы на основе стандартных камер машинного зрения обладают следующими рабочими характеристиками:

- пространственное разрешение: не хуже 0.2 мм;
- интегральный режим работы (1 кадр за 10 – 20 с) (Рисунок 2.2.23):
  рабочая амплитуда среднего тока > 1 мкА,
  рабочее давление остаточного газа в ионопроводе: $>10^{-7}$ мбар.
- присоединительный стандарт: Conflat DN35, DN63, DN100;
- продольный размер для установки в ионопровод: размеры куба в стандартах Conflat DN35, DN63, DN100.

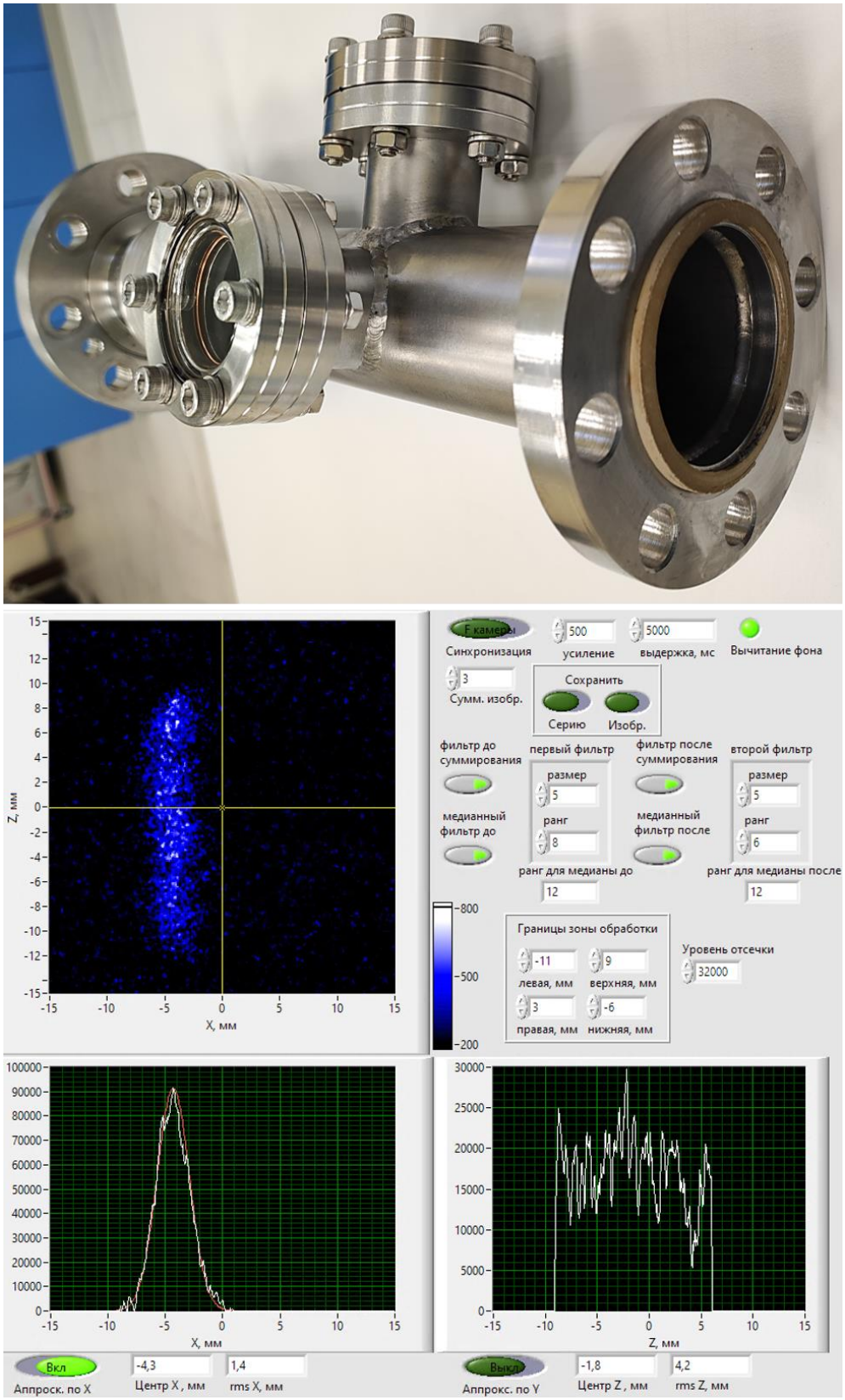


Рисунок 2.2.23 – Фотография ФЛУМ и результат измерения профиля пучка протонов энергией 400 кэВ и средним током 650 нА (на частоте 50 Гц), рабочее давление остаточного газа в ионопроводе ~10^{-6} мбар.

2.3 *Измерители поперечного эмиттанса пучка*

Диафрагмированные измерители эмиттанса

Разработка и изготовление диафрагмированных измерителей эмиттанса производились с использованием ЭОП на основе МКП с люминесцентным экраном, изображение с которого регистрируется видеокамерой, и медной диафрагмированной маски (Рисунок 2.3.1).

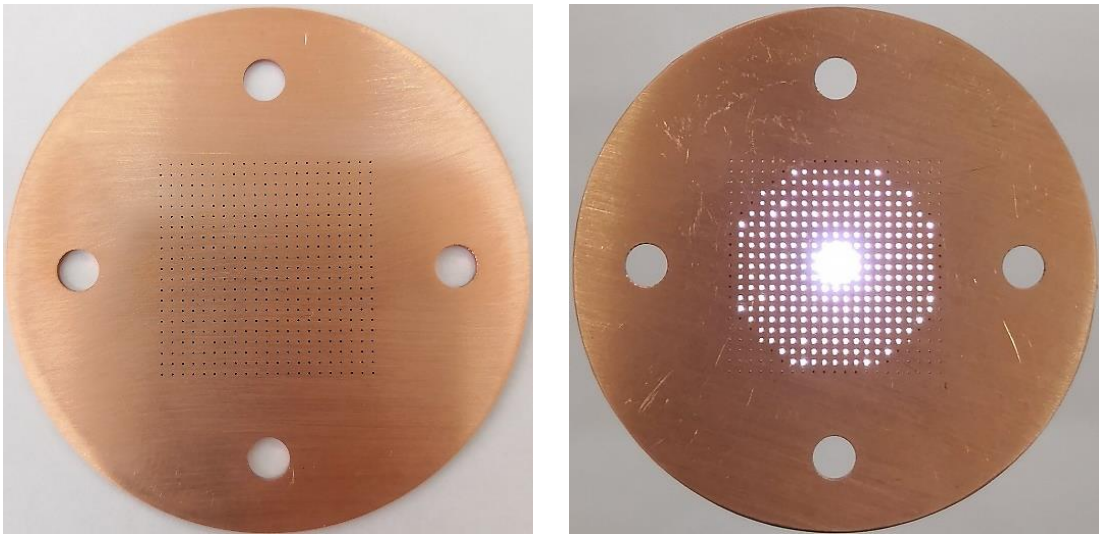


Рисунок 2.3.1 – Фотография опытного образца изготовленной маски: отверстия диаметром 0.2 мм с шагом 1 мм в медной пластине толщиной 1 мм

Конструктивные особенности

Технология изготовления отверстий отрабатывалась на нескольких опытных образцах. Итоговый вариант маски был изготовлен из медной пластины толщиной 0.5 мм с механически выполненными отверстиями диаметром 100 мкм, расположенными с шагом 1 мм так, чтобы рабочая апертура составляла квадрат со стороной 25 мм, время изготовления на ЧПУ-станке составило ~12 часов.

Качество изготовления маски проверялось визуально под микроскопом (Рисунок 2.3.2) в сравнении со стандартной позолоченной вольфрамовой проволокой диаметром 100 мкм.

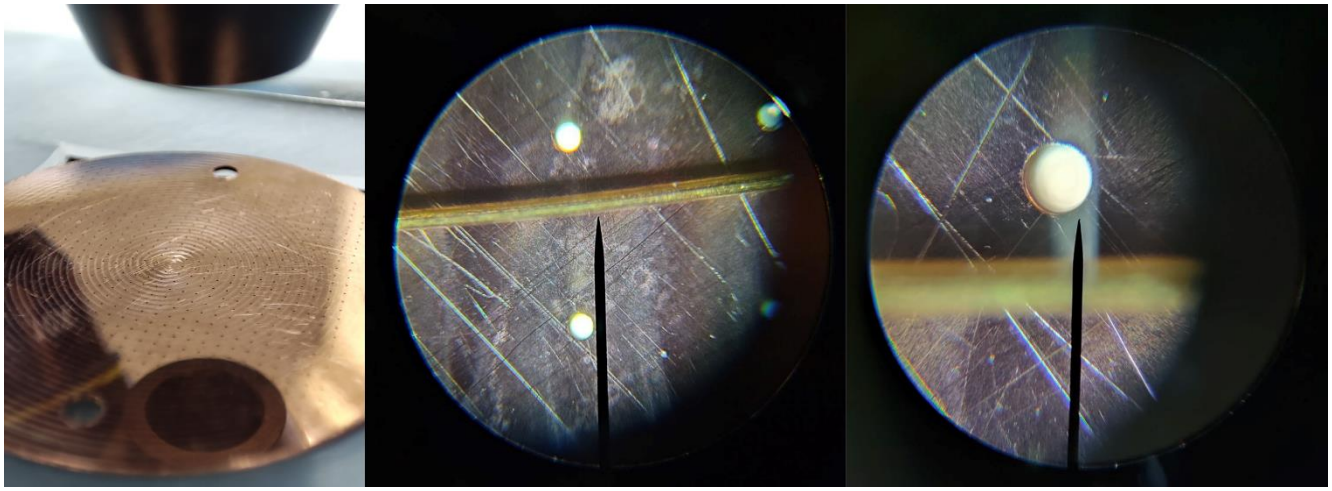


Рисунок 2.3.2 – Фотография итогового варианта изготовленной маски: отверстия диаметром 0.2 мм с шагом 1 мм в медной пластине толщиной 1 мм

По аналогии с ионизационным монитором поперечного сечения, используется электронно-оптический преобразователь из линейки «Баспик», а в качестве основы вакуумной камеры выбран стандартный куб CF-150, который, при необходимости, может быть использован в качестве готового диагностического бокса для размещения дополнительного оборудования, помимо измерителя эмиттанса. Вакуумный ввод линейного движения используется для передвижения измерительной части, по аналогии с цилиндром Фарадея. Максимальное расстояние от маски до ЭОП равно 67 мм, при этом маску можно приближать к ЭОП с дискретным шагом 10 мм до расстояния 17 мм, что даёт возможность при необходимости регулировать разрешающую способность и увеличивать измерительный диапазон для работы с сильно расходящимися пучками. Трехмерная модель и фотография внутренней измерительной сборки для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ представлены на рисунке 2.3.3.

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик

Изображение каждого отверстия в маске должно достоверно обрабатываться при помощи видеокамеры. Для выбранной геометрии маски с отверстиями диаметром d = 100 мкм можно считать, что на 1 мм регистрируемого изображения приходится 40 пикселей матрицы Full HD видеокамеры.

Рисунок 2.3.3 – Трехмерная модель диафрагмированного измерителя эмиттанса и фотография измерительной сборки для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ

Для оценки было принято, что для достоверной обработки профиля изображения необходимо не менее 20 точек, следовательно, полный размер (при нормальном распределении) изображения отверстия D должен быть не менее 500 мкм. Для того чтобы угловое разрешение соответствовало $\alpha_{min} = 1$ мрад, расстояние между маской и ЭОП должно быть равно:

$$L = \frac{D - d}{6\alpha_{min}} = 66.7 \text{ мм}. \quad (2.3.1)$$

Для обеспечения заявленного пространственного разрешения расстояние между отверстиями s было принято равным 1 мм. В таком случае максимальная величина среднеквадратичного углового расхождения, которая может быть точно измерена, $\alpha_{3\sigma}$ (максимальный угол, при котором профили пучка от соседних отверстий не начинают пересекаться) оценивается по следующей формуле:

$$\alpha_{3\sigma} = \frac{s-d}{6L} = 2.3 \text{ мрад.} \tag{2.3.2}$$

На рисунке 2.3.4 представлены зависимости углового разрешения и максимальной величины углового расхождения от расстояния между маской и ЭОП. Поскольку обе величины обратно пропорциональны расстоянию, то при его увеличении улучшается угловое разрешение, но уменьшается рабочий диапазон прибора, а при уменьшении расстояния диапазон увеличивается, а разрешающая способность падает.

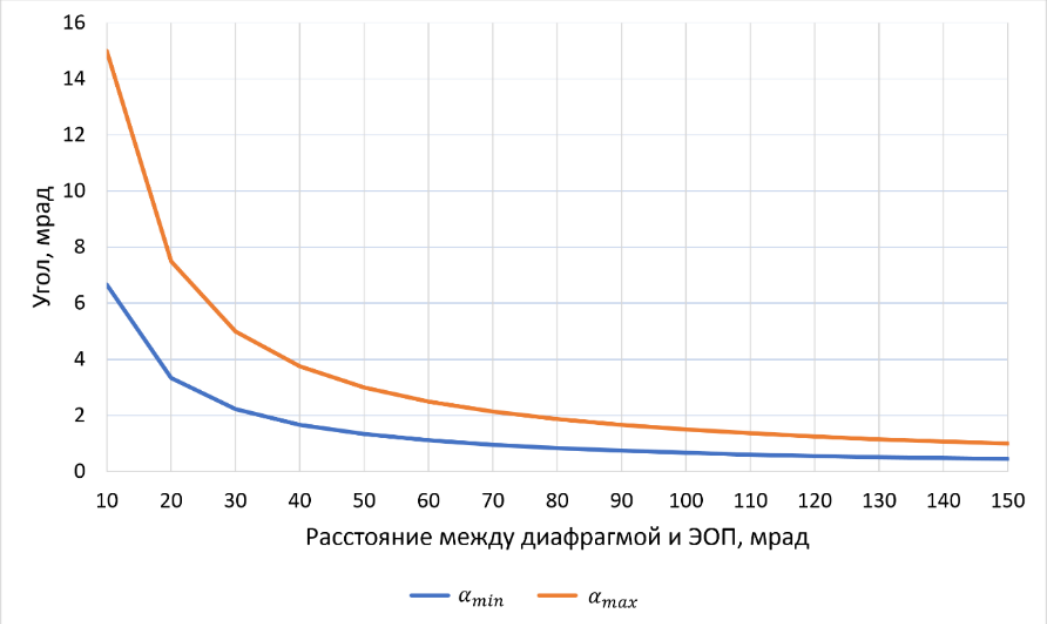


Рисунок 2.3.4 – График зависимости α_{min} и α_{max} от расстояния между маской и ЭОП

Также была проведена оценка для максимально измеряемого угла. Она может быть сделана при условии, что профили пучка от двух соседних отверстий пересекаются на полувысоте. Если данное условие выполнено, то оценка сверху среднеквадратичного углового расхождения α_{FWHM} определяется по следующей формуле

$$\alpha_{FWHM} = \frac{s}{4\sqrt{2\ln 2}\,L} = 3.2 \text{ мрад.} \quad (2.3.3)$$

При увеличении расстояния между отверстиями до 2 мм, максимально измеряемый угол увеличивается до 6.36 мрад.

Поскольку пластина имеет конечную толщину t, то максимальный среднеквадратичный угол $\alpha_{\text{маски}}$, который может иметь частица, проходящая через отверстие, определяется по формуле

$$\alpha_{\text{маски}} = \frac{d}{2t} = 100 \text{ мрад,} \quad (2.3.4)$$

что больше, чем максимально измеряемый угол.

Выше было отмечено, что маска изготавливается с некоторыми неточностями, при этом на пространственное разрешение влияет точность расположения отверстий и точность установки самой диафрагмированной маски. При изготовлении отверстий диаметром 100 мкм при помощи сверления допуски на диаметр составляли ±10 мкм, угловые допуски не превышали ±0.3 мрад, а точность установки маски была принята равной ±50 мкм и ±0.3 мрад.

Параметры электроники

Основой электроники диафрагмированного измерителя эмиттанса, по аналогии с ИМПС, является видеокамера машинного зрения стандарта GigE. В качестве оптимального варианта видеокамеры для регистрации изображений маски на люминофоре ЭОП так же выбрана монохромная камера с ПЗС-сенсором и глобальным затвором производства фирмы ContrasTech (Китай), работающая в стандарте GigE Vision в совокупности со стандартным промышленным объективом.

Обработка данных ведется в ПО на основе платформы LabVIEW, позволяющим осуществлять управление параметрами высоковольтного источника и видеокамеры, а также проводить математическую обработку регистрируемых изображений диафрагмированной маски.

Итоговые эксплуатационные параметры разработанных измерителей

Исходя из результатов расчетов и численного моделирования, разработанные измерители эмиттанса на основе диафрагмированной маски (рисунок 2.3.5), ЭОП с микроканальными пластинами и стандартной камеры машинного зрения обладают следующими параметрами, комбинации которых необходимо предварительно численно оценивать, исходя из допустимых импульсных и средних тепловых нагрузок на медную маску, по аналогии с цилиндром Фарадея:

- пространственное разрешение: не хуже 1 мм;
- угловое разрешение: переменное, с наилучшим значением 1 мрад;
- рабочая амплитуда импульса тока: 0.1 ÷ 50 мА;
- рабочая длительность импульса тока: 0.1 ÷ 100 мкс;
- рабочая частота следования импульсов: 1 Гц (наладочный режим);
- присоединительный стандарт: Conflat DN35, DN63, DN100;
- продольный размер для установки в ионопровод: ~250 мм;
- рабочее давление остаточного газа в ионопроводе: < 10^{-5} Торр.

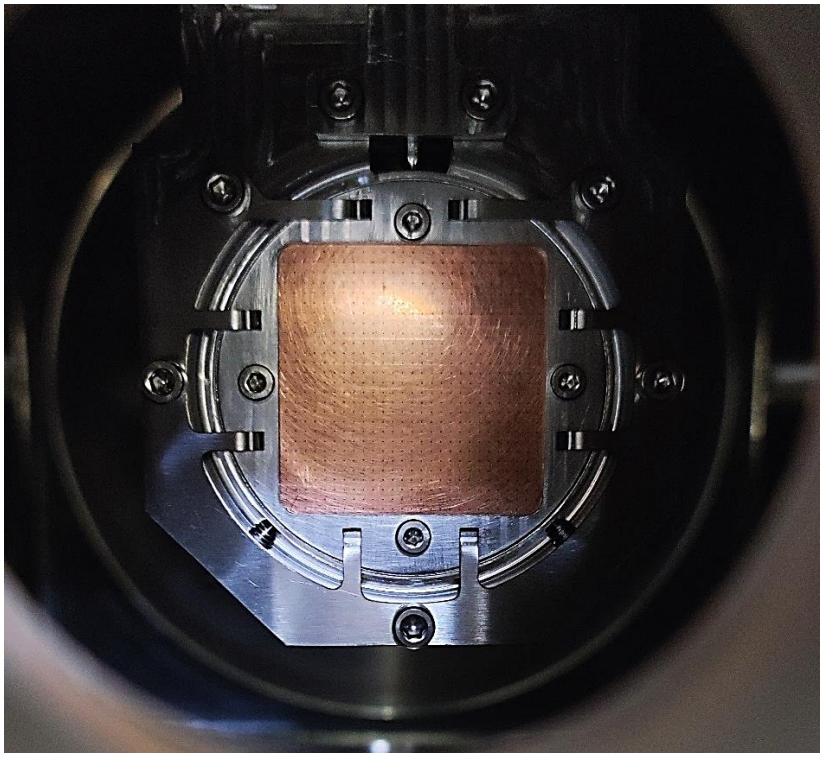


Рисунок 2.3.5 – Фотография установленной маски диафрагмированного измерителя

Щелевые измерители эмиттанса

Разработка конструкции щелевых измерителей эмиттанса производилась с учетом соображений о компактности итоговых устройств

Конструктивные особенности

Обе щели шириной 100 мкм размещаются взаимно перпендикулярно на одной пластине с помощью юстируемых шторок (Рисунок 2.3.6), равномерность ширины щели проверяется калибровочным щупом. Ввод щелей в ионопровод выполняется в таком случае под углом 45° к горизонтальной оси.

Профилометры типа «арфа» так же предлагается изготавливать на общей рамке с вводом в ионопровод под углом 45°. Для каждой из осей профилометр состоит из 25 проволочек с переменным шагом: центральные 13 проволочек с шагом 0.5 мм и по 6 проволочек по краям с шагом 1 мм. Суммарная измеряемая область составляет 18 мм.

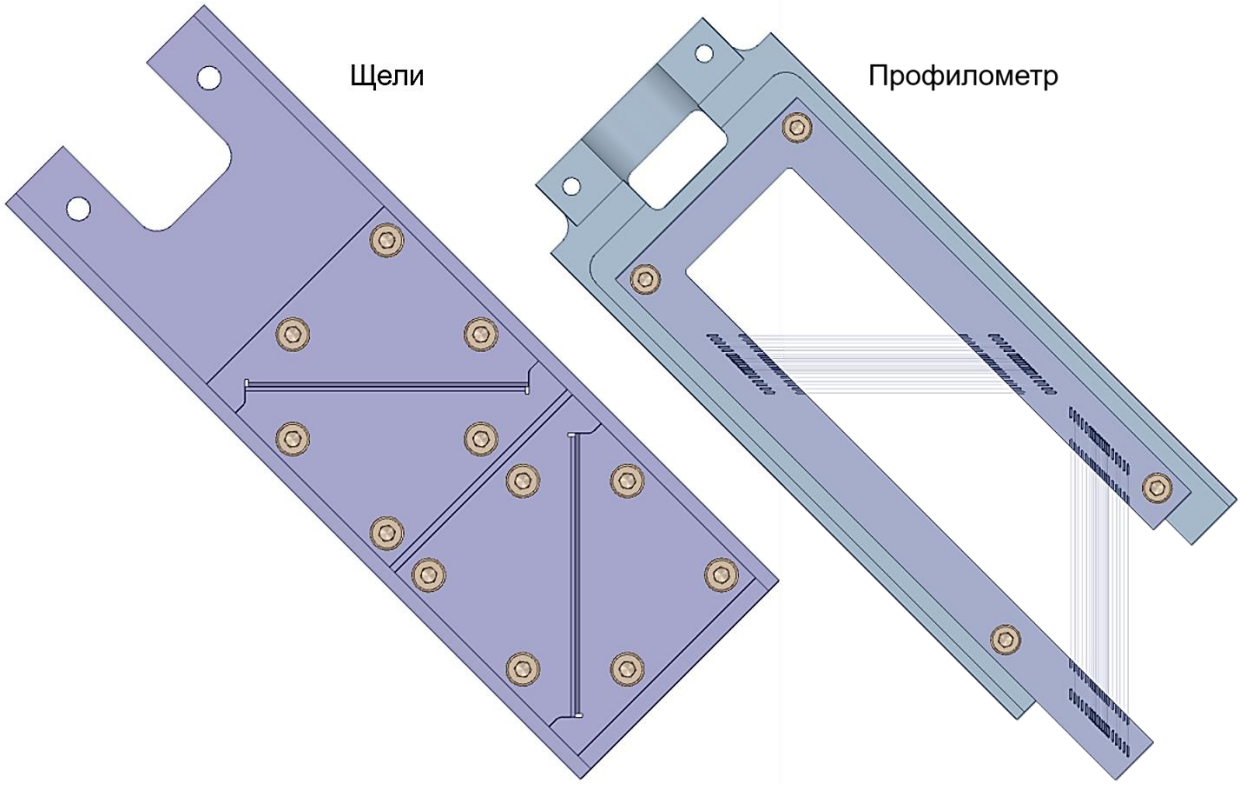


Рисунок 2.3.6 – Трехмерные модели щелей и профилометра щелевого измерителя эмиттанса для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик

Для выбранной конфигурации компонентов щелевого измерителя эмиттанса была произведена оценка пространственного и углового разрешения. Базовое пространственное разрешение определяется шириной щели и составляет 100 мкм. Угловое разрешение α, зависящее от длины промежутка дрейфа L, радиуса проволочки $r_{\text{пров}}$ и расстояния между проволочками $d_{\text{пров}}$, равно:

$$\alpha = \frac{d_{\text{пров}} + 2r_{\text{пров}}}{L}. \tag{2.3.5}$$

При характерном промежутке дрейфа 1000 мм угловое разрешение в центральной области составляет 0.6 мрад. Рабочий диапазон измерителя определяется максимальным среднеквадратичным угловым расхождением α_{max}, которое может быть точно измерено детектором. Для оценок было принято, что угловое расхождение можно точно измерить, если получившийся после щели профиль не превышает рабочую апертуру профилометра h. Тогда угловое расхождение находится по формуле

$$\alpha_{max} = \frac{h}{6L} \approx 3 \text{ мрад}. \tag{2.3.6}$$

В случае, если среднеквадратичные размеры пучка будут превышать максимально измеримые, можно уменьшить промежуток дрейфа. Минимальная величина промежутка дрейфа L_{min} оценивается по следующей формуле

$$L_{min} = \frac{d_{\text{пров}} + 2r_{\text{пров}}}{\alpha_{min}}, \tag{2.3.7}$$

где α_{min} – минимальное угловое разрешение.

Принимая допущение, что конечная толщина щели вносит малые искажения углового распределения пучка, можно считать, что через щель пройдут все частицы, которые в нее попадают. Тогда величина заряда, образовавшегося на проволочках профилометра, рассчитывается так же, как для проволочного сканера. В таблице 2.3.1 указаны величины образующегося на проволочках заряда для некоторых типичных параметров пучков ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Таблица 2.3.1 – Заряд, образующийся на проволочке для разных параметров пучка

Энергия пучка, МэВ/нуклон	Среднеквадратичный размер пучка, мм	Угловое расхождение пучка, мрад	Заряд для протонов, пКл	Заряд для ионов, пКл
0.82	1	1	40	10
7.5	1	1	30	10

Параметры электроники

Используемая для измерителя эмиттанса электроника аналогична электронике многопроволочного профилометра.

Итоговые эксплуатационные параметры разработанных измерителей

Исходя из результатов расчетов и численного моделирования, разработанные щелевые измерители эмиттанса (Рисунок 2.3.7) обладают следующими рабочими параметрами, комбинации которых необходимо предварительно численно оценивать, исходя из допустимых импульсных и средних тепловых нагрузок на щели и проволочки, по аналогии с цилиндром Фарадея и многопроволочным профилометром:

- пространственное разрешение: не хуже 0.1 мм;
- угловое разрешение: переменное, с наилучшим значением 0.6 мрад;
- рабочая амплитуда импульса тока: 0.1 ÷ 50 мА;
- рабочая длительность импульса тока: 0.1 ÷ 100 мкс;
- рабочая частота следования импульсов: 1 Гц (наладочный режим);
- присоединительный стандарт: Conflat DN35, DN63, DN100;
- продольный размер участка дрейфа: > 1000 мм.

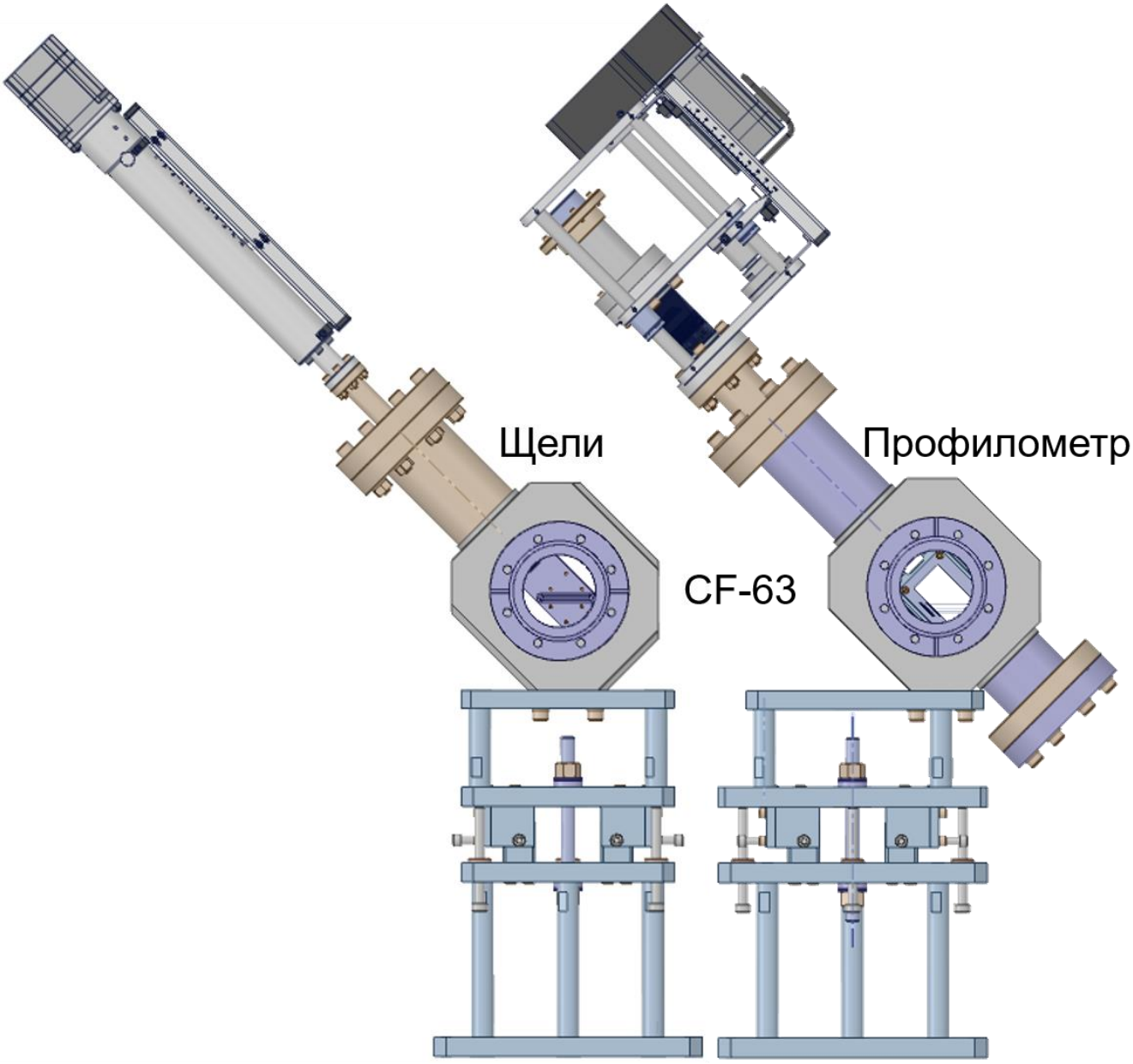


Рисунок 2.3.7 – Трехмерные модели щелевого и профилометрического узлов щелевого измерителя эмиттанса для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ в сборе с вводами линейного движения и юстируемыми подставками

2.4 *Измерители положения и фазы пучка*

Полосковые датчики положения пучка

Для создания конструкций датчиков положения и фазы была выбрана конфигурация короткозамкнутых полосковых датчиков положения пучка, и предложена методика для их последовательной разработки [16], объединяющая этапы трехмерного моделирования, оптимизации конструкции, изготовления опытного образца и калибровки в стендовых испытаниях:

1. На первом этапе выполняется детальный электромагнитный анализ с расчётом передаточного импеданса при разных геометрических параметрах.
2. Далее на основе полученных результатов проводится оптимизация размеров электродов, а также выполняется согласование полосковой линии с сигнальным разъёмом для обеспечения минимальных отражений сигнала в рабочем диапазоне частот.
3. В соответствии с полученными геометрическими параметрами изготавливается опытный образец.
4. Далее проводятся стендовые испытания изготовленного образца. В частности, на векторном анализаторе цепей измеряются S-параметры и передаточный импеданс, а также измеряется линейность отклика, чувствительность и разрешение.
5. По результатам стендовых испытаний происходит доработка конструкции опытного образца и/или оптимизация сборки отдельных узлов датчика.

Разработанная методика проектирования, оптимизации и экспериментальной калибровки короткозамкнутого полоскового датчика положения может быть использована при создании подобных устройств диагностики для широкого класса линейных ускорителей ионов с различными параметрами пучков.

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик

Для описания формирования сигнала в полосковом электроде используется теория линий передач. Расчет сигналов в длинных линиях основывается на решении уравнений Максвелла для распространения TEM (англоязычный термин: Transverse ElectroMagnetic) волн [44], где пучок, пролетающий вблизи полоскового электрода, выступает как внешний источник тока с плотностью j (рисунок 2.4.1).

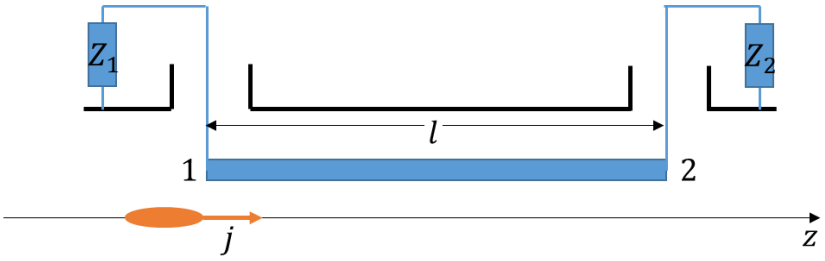


Рисунок 2.4.1 – Схема пролёта пучка вдоль полосковой линии

Поля между полосковым электродом и корпусом имеют только поперечные компоненты. Сигнал от сгустка, который двигается параллельно оси z, генерируется в линии только в моменты пересечения сгустком краев электрода 1 и 2, так как только там электрическое и магнитное поля имеют ненулевую продольную компоненту. Напряжение на выходе порта 1 является суперпозицией сигналов от волн, сгенерированных пучком при прохождении около краев полоскового электрода и их отражений.

Рассмотрим два наиболее часто встречаемых типа полосковых датчиков. Полосковые датчики положения, электроды которых нагружены с двух концов $Z_1 = Z_2 = Z_0$, где Z_0 – волновое сопротивление полосковой линии длиной l, называются согласованными. Датчики положения, у которых при этом один из концов полосковых линий заземлен, называются короткозамкнутыми.

В случае согласованного датчика сигналы, сгенерированные пучком, полностью уходят в согласованные нагрузки. В этом случае пример зависимости напряжения на 1 и 2 порте от времени показан на рисунке 2.4.2. Например, сигнал на порте 1 имеет 2 пика разной полярности, разделенные во времени на $l/c + l/v_b$.

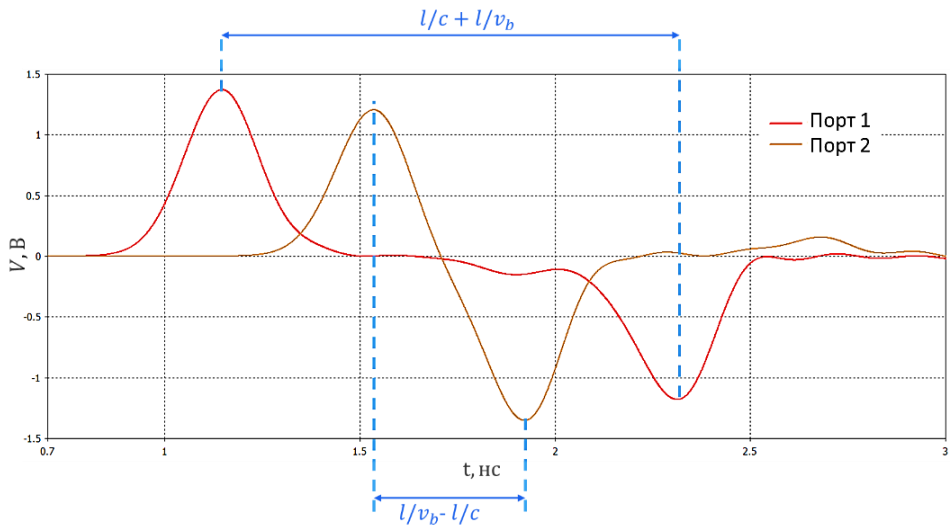


Рисунок 2.4.2 – Напряжение на портах 1 и 2 от сгустка протонов энергией 160 МэВ

Для электрода, нагруженного с одной стороны и закороченного с другой ($Z_2 = 0$) пучок не генерирует дополнительного сигнала при прохождении второго конца полосковой линии. Сигнал с порта 1 для этого случая представлен на рисунке 2.4.3 и представляет собой 2 пика противоположной полярности, разделенных во времени на величину $2l/c$.

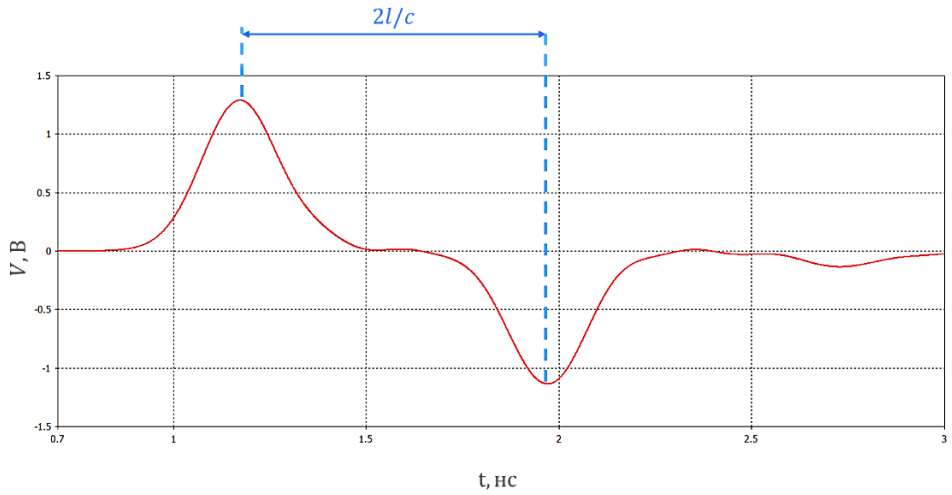


Рисунок 2.4.3 – Напряжение на порте 1 от сгустка протонов энергии 160 МэВ

В случае, если электроды на втором конце не идеально закорочены, ток изображения генерирует импульс в момент времени $l/c + l/v_b$. Данный импульс делится на 2: один движется по электроду к порту 1, а второй движется по закоротке к корпусу, отражается, и движется к порту 1 с измененной полярностью.

В результате в итоговом сигнале появляются еще 2 пика разной полярности. Время движения по закоротке $t_{gap} = 2 \cdot g/c$, где g – ширина зазора между полосковым электродом и корпусом. Если данное время значительно меньше длительности сгустка, то импульсы разной полярности наложатся друг на друга, и результирующая амплитуда сигнала будет мала. На рисунке 2.4.4 приведена зависимость напряжения на порте 1 от времени для данного случая.

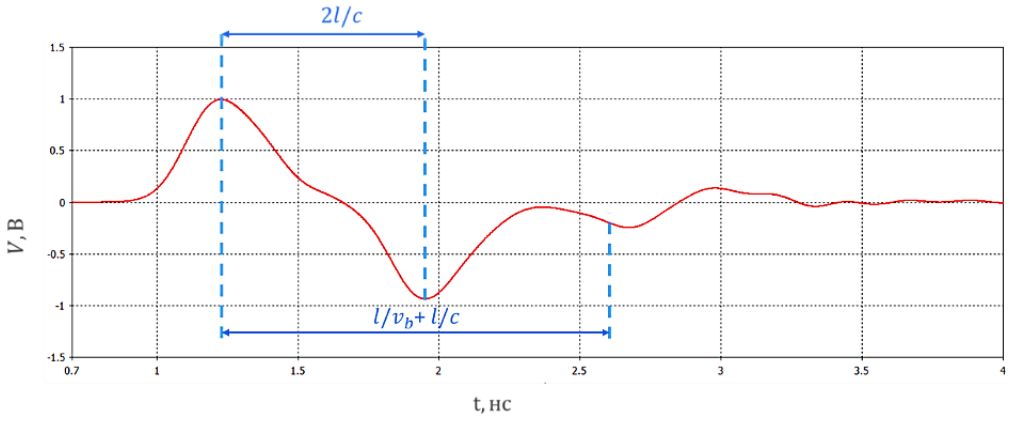


Рисунок 2.4.4 – Напряжение на порте 1 от сгустка протонов энергией 50 МэВ

Отклик датчика на последовательность гауссовых сгустков

Спектр сигнала полоскового электрода является произведением спектра тока сгустка на передаточный импеданс, который в случае закороченного полоскового электрода определяется соотношением:

$$Z = \frac{Z_0}{2} \cdot \frac{\varphi}{360^\circ} \sin \frac{2\pi f l}{c}, \tag{2.4.1}$$

где φ – угловой размер электрода в градусах, а f – частота считывания сигнала

Для получения конечной аналитической формулы для амплитуды регистрируемого сигнала полосковых электродов рассмотрим периодическую последовательность сгустков, проходящих вдоль электрода с частотой следования f_0.

Ток отдельного сгустка можно представить как ряд Фурье с коэффициентами A_m:

$$I(t) = \langle I \rangle + 2\langle I \rangle \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos 2\pi m f_0 t \tag{2.4.2}$$

где $\langle I \rangle = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} I(t) dt$ – средний ток сгустка за $T_0 = 1/f_0$, т.е. импульсный ток пучка.

Коэффициенты A_m определяются формой сгустков. В случае бесконечно короткого сгустка $A_m = 1$ для всех m, что означает равномерное распределение весов всех частот в спектре. Если же длительность сгустка конечна, амплитудный фактор A_m снижается с увеличением частоты. Если временно́е распределение тока в сгустке описывается гауссовой функцией, то амплитудный фактор A_m от m выражается простой аналитической формулой:

$$A_m = \exp\left(-\frac{m^2(2\pi f_0)^2\sigma^2}{2}\right) \tag{2.4.3}$$

График зависимости амплитудного фактора от номера гармоники m рабочей частоты начальной части ЛУ ИЯИ РАН для различных длительностей сгустков представлен на рисунке 1.7.

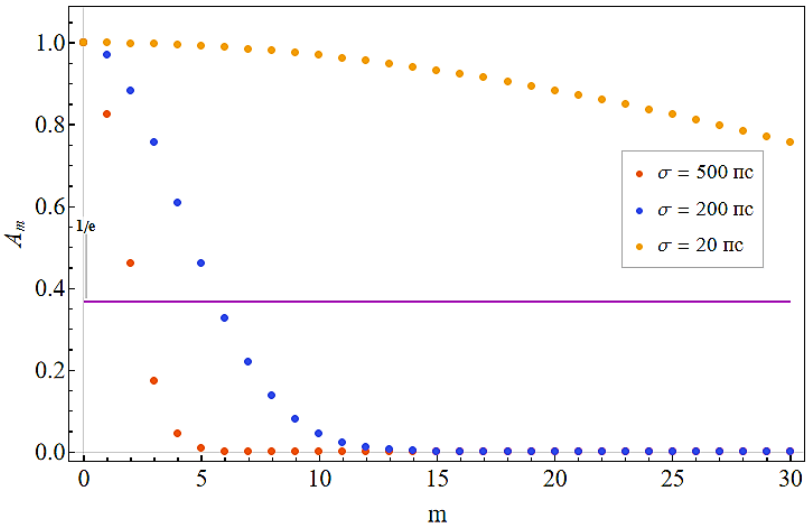


Рисунок 2.4.5 – Зависимость амплитудного фактора от номера гармоники m для сгустков разных длительностей, $f_0 = 198.2$ МГц

На рисунке 2.4.6 показано влияние длительности импульса тока на итоговый сигнал. Для коротких сгустков ($\sigma < \frac{1}{Mf_0}$, где M – максимальная интересующая гармоника) напряжение повторяет форму передаточного импеданса с небольшими искажениями, а для длинных – форма и амплитуда сигнала определяются спектральной зависимостью тока сгустка, что нужно учитывать при обработке сигналов от длинных сгустков на высоких гармониках ускоряющей частоты.

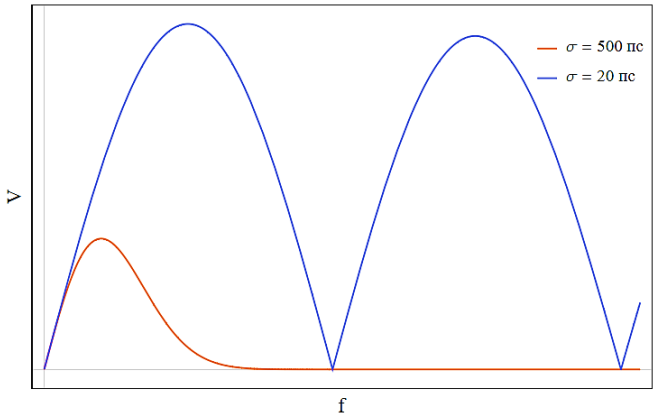


Рисунок 2.4.6 – Зависимость напряжения на полосковом электроде от частоты для коротких и длинных сгустков

Измерение положения пучка

Для определения поперечных координат центра масс сгустка (x, y) используются значения амплитуд сигналов с противоположных электродов по каждой из осей (рисунок 2.4.7).

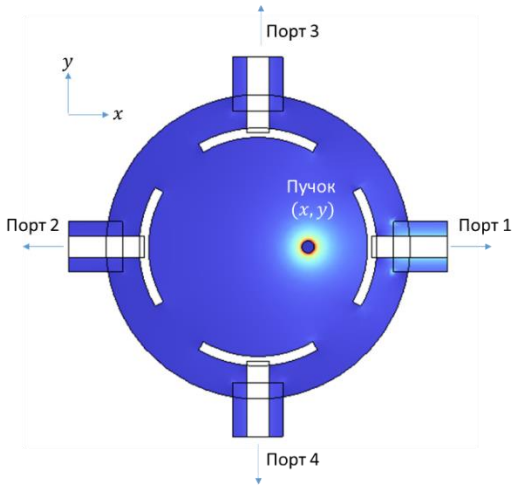


Рисунок 2.4.7 – Схема расположения портов и электродов в датчике положения

В общем случае напряжение на каждом из электродов является функцией как от положения, так и от тока в сгустке. Для получения независимых от тока координат используются различные процедуры нормализации. Две наиболее часто используемые методики - обработка Δ/Σ (англ.: difference over sum), при которой разности напряжений на противоположных электродах делятся на их суммы и логарифмическая обработка, где берется логарифм отношения сигналов.

Пусть напряжения на каждом из портов равняются V_1, V_2, V_3, V_4. По методу Δ/Σ положение определяется соотношением:

$$x = \frac{1}{s_x}\frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} + x_0 = \frac{1}{s_x}\Delta/\Sigma_x + x_0\,; y = \frac{1}{s_y}\frac{V_3 - V_4}{V_3 + V_4} + y_0 = \frac{1}{s_y}\Delta/\Sigma_y + y_0, \quad (2.4.4)$$

где s_x, s_y – чувствительности датчика по осям x и y, (x_0, y_0) – координаты электрического центра датчика.

Чувствительность измеряется в %/мм и зависит от геометрии ДПП, энергии сгустков, обрабатывающей электроники и частоты считывания сигнала. Электрический центр датчика может не совпадать с геометрическим из-за несимметричности сборки, а также неидентичности электрических характеристик разъемов и кабелей, по которым считывается сигнал.

С помощью логарифмической обработки положение рассчитывается по формуле:

$$\begin{gathered} x = \frac{1}{s_{0x}} 20\log_{10}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) + x_0 = \frac{1}{s_{0x}}\Delta_{LOGx} + x_0\ ; \\ y = \frac{1}{s_{0y}} 20\log_{10}\left(\frac{V_3}{V_4}\right) + y_0 = \frac{1}{s_{0y}}\Delta_{LOGy} + y_0, \end{gathered} \quad (2.4.5)$$

где s_{0x}, s_{0y} – чувствительности датчика по осям x и y в дБ/мм.

Разность и сумма напряжений на противоположных электродах углового размера φ, генерируемых смещенным на (x, y) пучком, вычисляются по формулам:

$$\Delta = -\frac{2I}{\pi a} x \sin\frac{\varphi}{2}, \Sigma = -\frac{I}{\pi}\varphi \quad (2.4.6)$$

Тогда аналитическое выражение для чувствительности метода Δ/Σ имеет вид:

$$s_x = \frac{2\sin\varphi/2}{\varphi a} \quad (2.4.7)$$

Для упрощения обработки сигнала производится линеаризация полученных данных. Положение, определенное по формулам 2.4.4 и 2.4.5, может быть представлено линейной функцией Δ/Σ или Δ_{LOG} с достаточной точностью в определенной области линейности, в качестве критерия которой будем считать, что абсолютное отличие линеаризованной координаты от реальной не превышает 100 мкм.

Из-за продольного уширения электрического поля сгустка амплитуды токов изображений на высоких частотах уменьшаются, что приводит к изменению чувствительности s на низких энергиях [129]. К релятивистской чувствительности s, которая определяется формулами 2.4.4, 2.4.5 и может быть измерена на тестовом стенде без пучка, добавляется слагаемое, содержащее фактор G, зависящий от энергии сгустков. В частности, итоговую чувствительность в случае процедуры нормализации Δ/Σ и логарифмической обработки можно рассчитать по формулам:

$$s(1+G) = 8(1+G)\frac{\sin\frac{\varphi}{2}}{\varphi\, a},$$
$$s_0(1+G) = \frac{160}{\ln 10}\,(1+G)\frac{\sin\frac{\varphi}{2}}{\varphi\, a}, \tag{2.4.8}$$

где a – радиус апертуры, φ – угловой размер

$$G = 0.139\left(\frac{\omega a}{\beta\gamma c}\right)^2 - 0.0145\left(\frac{\omega a}{\beta\gamma c}\right)^3, \tag{2.4.9}$$

где $\omega = m\omega_0$ – гармоника считывания сигнала, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – частота следования сгустков, β, γ – релятивистские факторы

Данная поправка зависит от соотношения радиуса апертуры и фактора $\frac{\omega}{\beta\gamma c}$.

Зависимость относительного изменения чувствительности от энергии для трех гармоник рабочей частоты представлена на рисунке 2.4.8 для апертуры 35 мм.

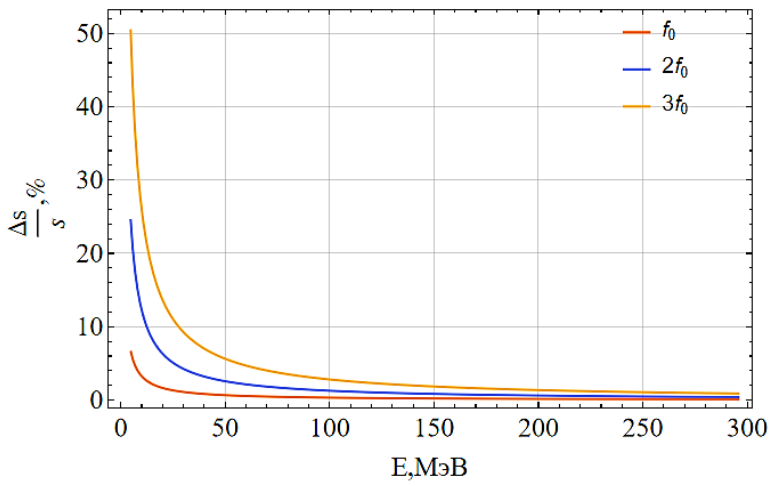


Рисунок 2.4.8 – Зависимость относительного изменения чувствительности от энергии для f_0 = 198.2 МГц

Изменение чувствительности наиболее сильно проявляется на высоких гармониках ускоряющей частоты, при этом относительное изменение становится незначительным начиная с энергии ~50 МэВ.

При наличии шума в сигнале, формула 2.4.4 для координаты x модифицируется следующим образом:

$$x = \frac{1}{s_x}\frac{V_1 - V_2 + \sigma_{V1} - \sigma_{V2}}{V_1 + V_2 + \sigma_{V1} + \sigma_{V2}} + x_0 = \frac{1}{s_x}\frac{\Delta + \sigma_{V1} - \sigma_{V2}}{\Sigma_0} + x_0 = \frac{1}{s_x}\frac{\Delta}{\Sigma_0} + \frac{1}{s_x}\frac{\sigma_{V1} - \sigma_{V2}}{\Sigma_0} + x_0 \quad (2.4.10)$$

где σ_{V1}, σ_{V2} – среднеквадратичные амплитуды шумов в сигналах с противоположных электродов, $\Sigma_0 = V_1 + V_2 + \sigma_{V1} + \sigma_{V2}$

Разрешением датчика положения можно считать минимальное смещение пучка, различимое на фоне шума:

$$\delta r = \frac{1}{s}\frac{\sigma_{V1} - \sigma_{V2}}{\Sigma_0}, \quad (2.4.11)$$

Для упрощения примем, что шум является случайным, одинаковым для сигнала с каждого электрода $\sigma_{V1} \approx \sigma_{V2} = \sigma_V$ и по величине много меньше амплитуды сигнала. Тогда в окрестности геометрического центра $\Sigma_0 \approx \Sigma = 2V$, $\Delta_{noise} = V_{N1} - V_{N2} = 0,\ \sigma_{noise} = \sqrt{\sigma_{V1}^2 + \sigma_{V2}^2} = \sigma_V\sqrt{2}$

Тогда итоговая формула для разрешения принимает вид:

$$\delta r = \frac{1}{s}\frac{\sqrt{2}\sigma_V}{2V} = \frac{1}{s\sqrt{2}}\frac{\sigma_V}{V}, \quad (2.4.12)$$

где σ_V – среднеквадратичный шум, V – амплитуда сигнала в геометрическом центре, s – чувствительность датчика.

Оптимизация геометрии ДПП

Геометрия датчиков положения оптимизируется для работы с конкретными параметрами пучка. В частности, далее приведены результаты оптимизации для работы на пучке ЛУ ИЯИ РАН с параметрами, указанными в таблице 2.4.1.

Таблица 2.4.1 – Параметры пучка протонов ЛУ ИЯИ РАН для моделирования

Параметр	**Значение**
Импульсный ток, I	10 мА
Рабочая частота следования сгустков, f_0	198.2 МГц
Длительность сгустка, τ	170 – 860 пс
Энергия, E	0.75 – 305 МэВ

Основные параметры геометрии, оказывающие влияние на характеристики датчика: ширина зазора между электродом и корпусом датчика g, угловой размер электрода φ, диаметр апертуры a, толщина электрода d. Модель полоскового короткозамкнутого датчика в COMSOL Multiphysics с обозначением указанных ключевых параметров представлена на рисунке 2.4.9.

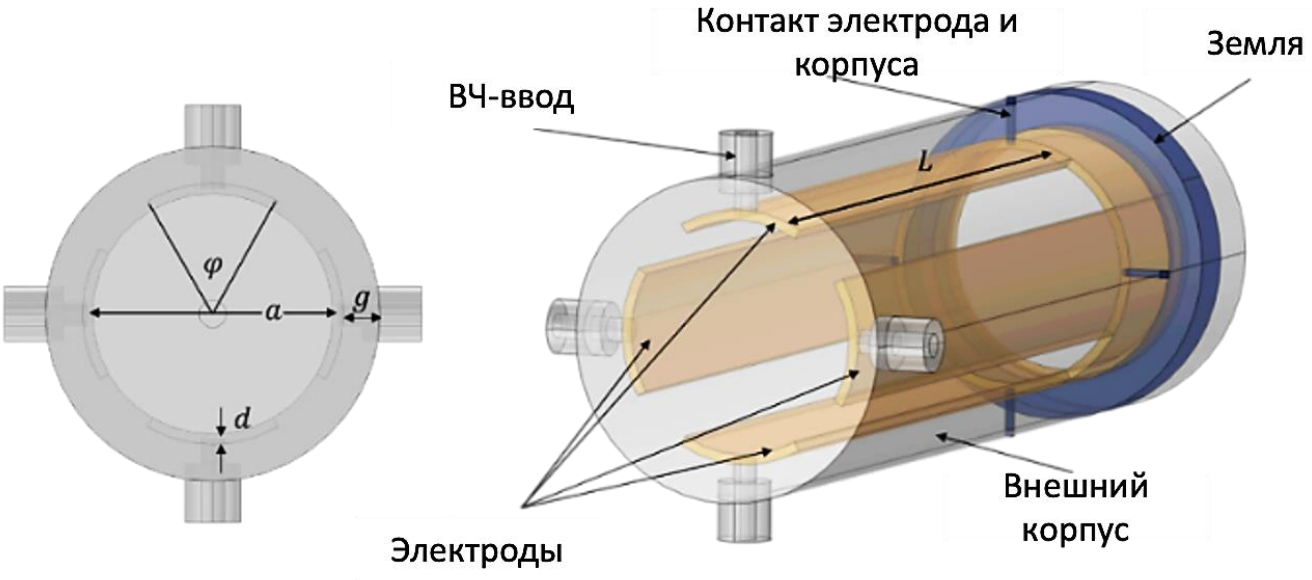


Рисунок 2.4.9 – Геометрия модели полоскового датчика положения

Расчет оптимальных параметров геометрии происходил в несколько этапов:

1. Согласование полосковой линии.
2. Оптимизация амплитуды сигнала на согласованном электроде

Согласование полосковых линий

Результаты расчета коэффициента стоячей волны (КСВ) для одного из портов с a = 35 мм и d = 1.5 мм. представлены на рисунке 2.4.10. Оптимальная ширина зазора равняется 5.2 мм.

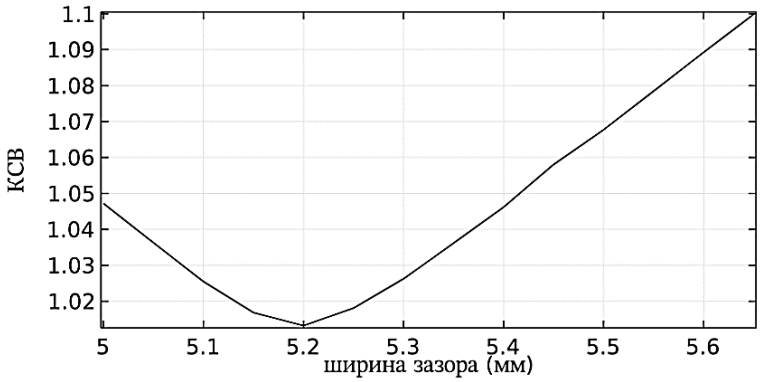


Рисунок 2.4.10 – Зависимость КСВ от ширины зазора между электродом и корпусом

Также данное измерение можно представить на диаграмме Смита (Рисунок 2.4.11). На графике представлены расчеты для разных гармоник ускоряющей частоты f_0. Оптимальной является ширина, при которой $z = 1$, что соответствует зеленой области на диаграмме. Очевидно, что оптимальная ширина зазора зависит от частоты и должна быть оптимизирована под рабочую частоту считывающей электроники.

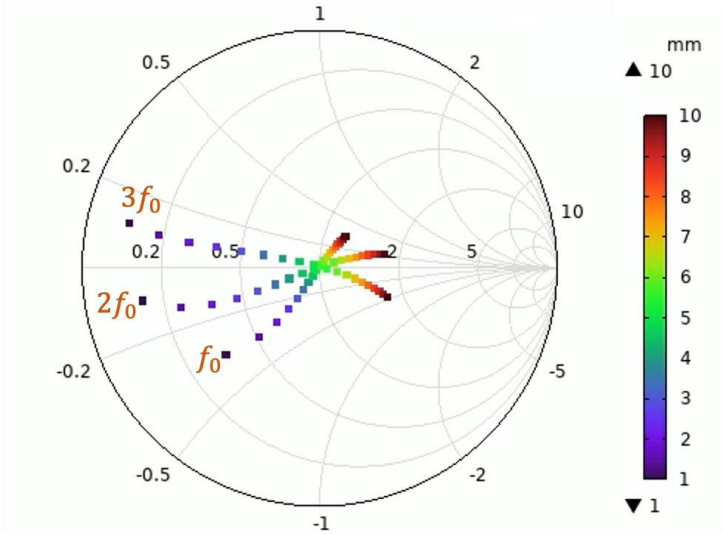


Рисунок 2.4.11 – Модельная диаграмма Смита для полосковой линии. Цветом показана ширина зазора g между электродом и корпусом

Альтернативным методом проверки согласования полосковой линии на 50 Ом является метод рефлектометрии во временной области [130]. На один из портов ДПП подается перепад напряжения с временем нарастания значительно меньше электрической длины неоднородности и исследуется отраженный сигнал, по форме которого можно определить характер и местоположение неоднородностей или рассогласование линии. С помощью численного анализа во временной области было рассчитано волновое сопротивление портов ДПП в зависимости от времени. Итоговый график представлен на рисунке 2.4.12.

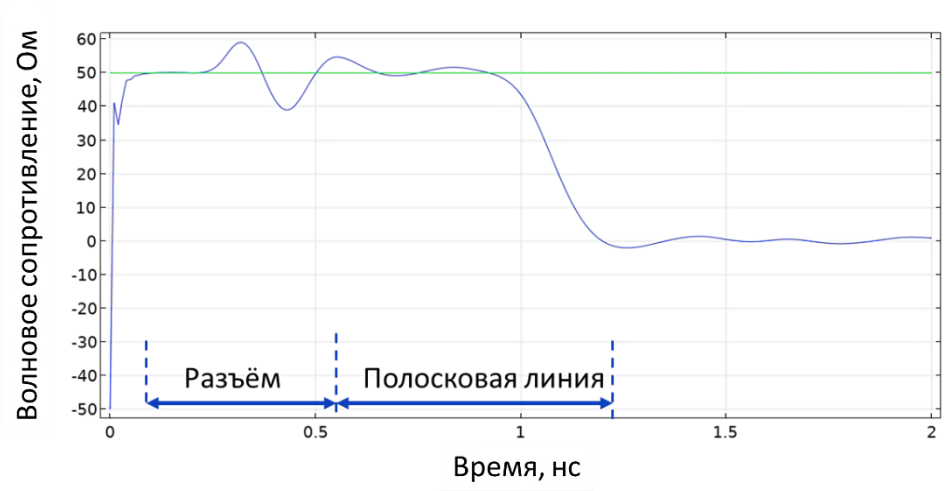


Рисунок 2.4.12 – Волновое сопротивление линии в зависимости от времени прохождения сигнала

В момент времени 0.4 нс сигнал распространяется между ВЧ-вводом и полосковым электродом по несогласованному участку, что вызывает колебания в волновом сопротивлении.

Максимизация амплитуды сигнала полоскового электрода

Передаточный импеданс, выражаемый формулой 2.4.1, определяет независимое от тока сгустка влияние параметров геометрии ДПП (длины и углового размера электродов) на амплитуду сигнала. Оптимальная длина, при которой передаточный импеданс максимален, определяется соотношением:

$$\cos\frac{2\pi f l}{c} = 0. \qquad (2.4.13)$$

Для 2 и 3 гармоник рабочей частоты оптимальные длины составляют 189 мм и 126 мм соответственно. Однако выбор длины ограничивается наличием свободного пространства в ускорительном тракте, поэтому для примера моделирования и практической реализации длина электродов была выбрана равной 100 мм. Пример расчетной зависимости напряжения на полосковом электроде при прохождении сгустка вдоль оси z от номера гармоники ускоряющей частоты представлен на рисунке 2.4.13. Амплитуда сигнала для электрода длиной 100 мм отличается от максимально возможной амплитуды на 2 и 3 гармониках на 26% и 5% соответственно. При этом для длинных сгустков наблюдается незначительное уменьшение амплитуды на 2 и 3 гармониках для любой длины из-за уменьшения амплитудного фактора A_m.

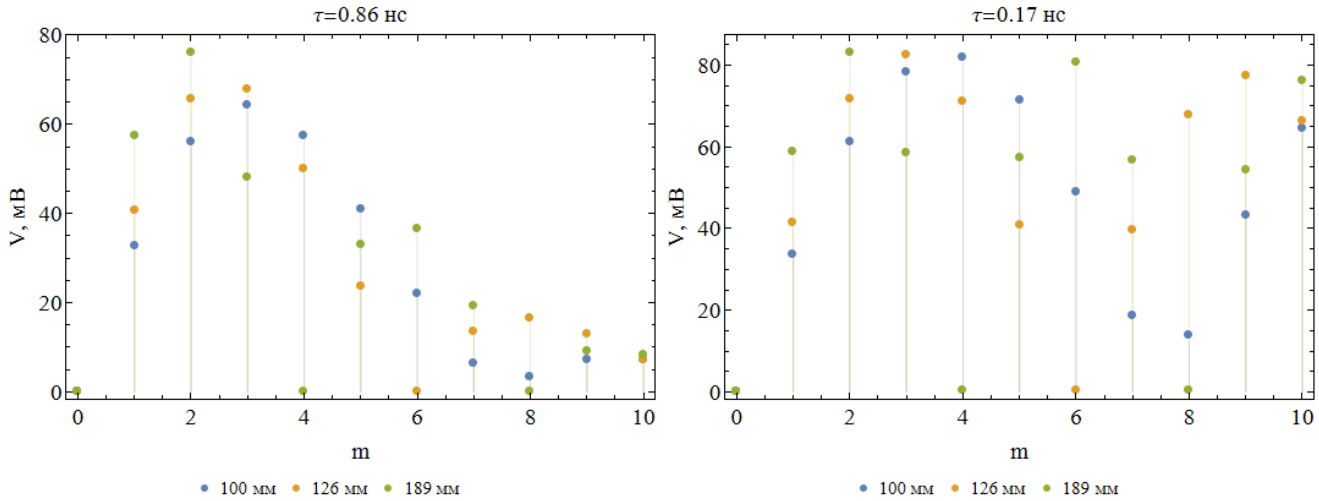


Рисунок 2.4.13 – Зависимость напряжения на полосковом электроде от номера гармоники для сгустков двух длительностей (импульсный ток пучка 10 мА)

Передаточный импеданс увеличивается с ростом углового размера электрода, однако взаимные емкостные связи между полосковыми линиями искажают сигнал, уменьшая чувствительность и область линейности датчика, так как величина емкостных связей определяется близостью электродов друг к другу и увеличивается с ростом углового размера.

С помощью численного моделирования были рассчитаны сигналы от противоположных полосковых электродов на третьей гармонике ускоряющей частоты для смещенного пучка при различных угловых размерах полосковых электродов, согласованных по волновому сопротивлению. Разность и сумма сигналов для фиксированного смещения 4 мм приведены на рисунке 2.4.14. Обе зависимости являются нелинейными из-за взаимных связей, при этом суммарный сигнал растет быстрее разностного.

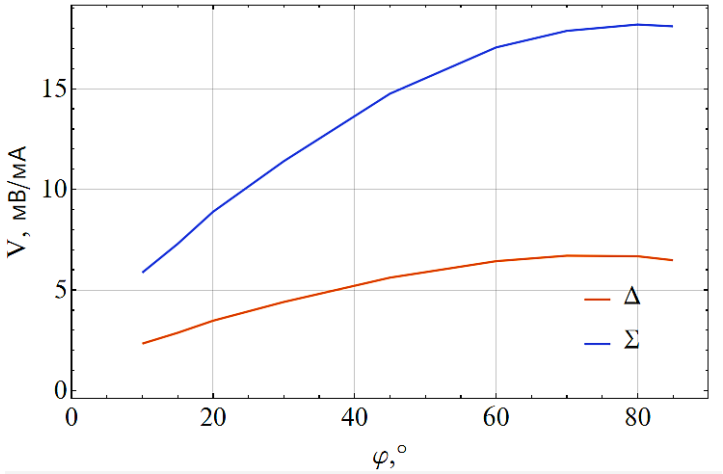


Рисунок 2.4.14 – Сумма и разность сигналов в зависимости от углового размера

На рисунке 2.4.15 приведены расчетные зависимости: чувствительности, разрешения и регистрируемой амплитуды сигнала от пучка в геометрическом центре ДПП – от углового размера электродов.

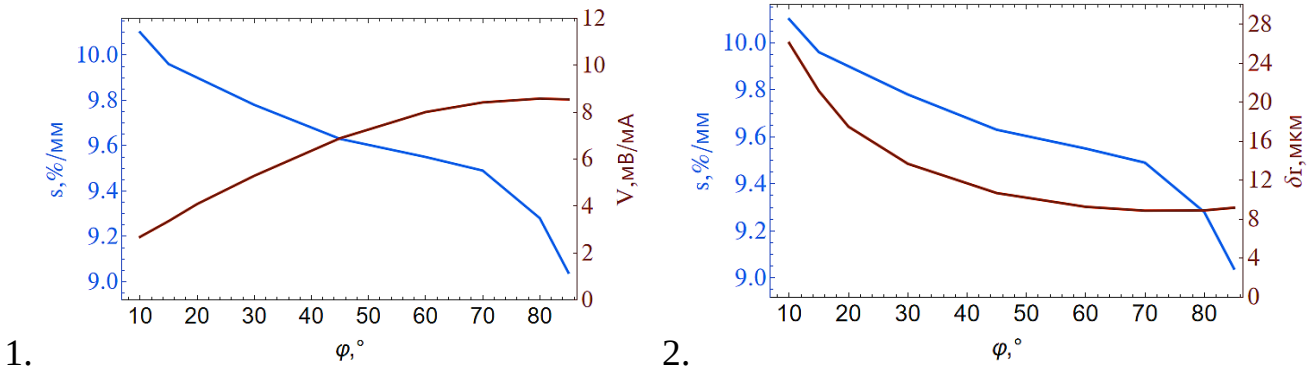


Рисунок 2.4.15 – 1. Зависимость чувствительности и амплитуды сигнала от углового размера электродов 2. Зависимость чувствительности и разрешения при шуме ($\sigma_V = 10^{-5}$ В) от углового размера электродов

С ростом углового размера чувствительность уменьшается, при этом разрешение улучшается из-за значительного роста амплитуды сигнала. Итоговый угловой размер для разработки универсальных конструкций ДПП был выбран равным 60 градусам как компромисс между достаточной чувствительностью, разрешением и амплитудой сигнала.

Также были рассчитаны взаимные связи (S-параметры) между противоположными и соседними портами ДПП для согласованных полосковых линий при значении углового размера электрода 60 градусов (Рисунок 2.4.16). Между соседними электродами значения не превышают -20 дБ, между противоположными: -25 дБ.

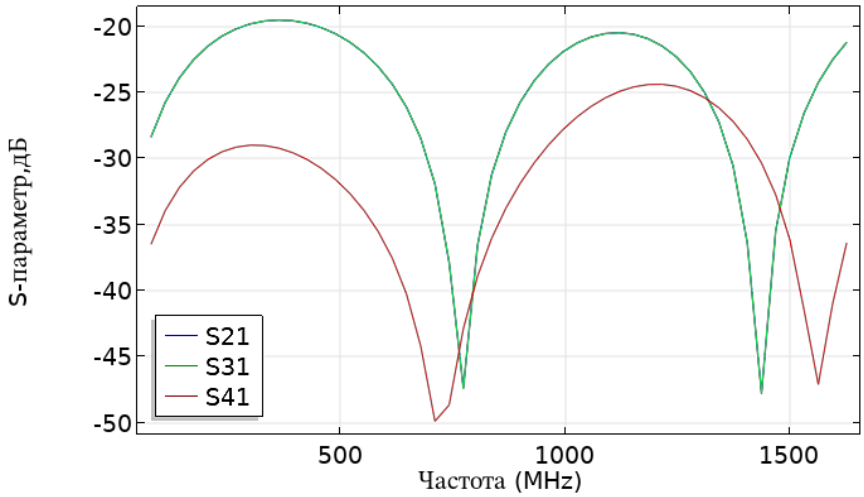


Рисунок 2.4.16 – S-параметры между противоположными и соседними электродами в зависимости от частоты считывания сигнала ДПП

Конструктивные особенности

В ходе выполнения работ были разработаны трехмерные модели (рисунок 2.4.17) короткозамкнутых полосковых ДПП, масштабированные для двух значений апертуры, наиболее типичных для линейных ускорителей ионов: 61 мм и 35 мм.

ДПП представляют собой разборные вакуум-плотные цилиндрические конструкции с одной парой электродов на каждую плоскость. Электроды выполнены в виде взаимно закороченных полосковых линий с волновым

сопротивлением 50 Ом, угловым размером 60º и масштабируемой длиной, которую можно оптимизировать для выбранной ВЧ-гармоники в зависимости от предполагаемой энергии и длительности сгустка частиц. Стандарт присоединительных фланцев соответственно CF-63 и CF-35. Съем сигналов с пластин осуществляется через вакуумные разъемы SMA-CF-16.

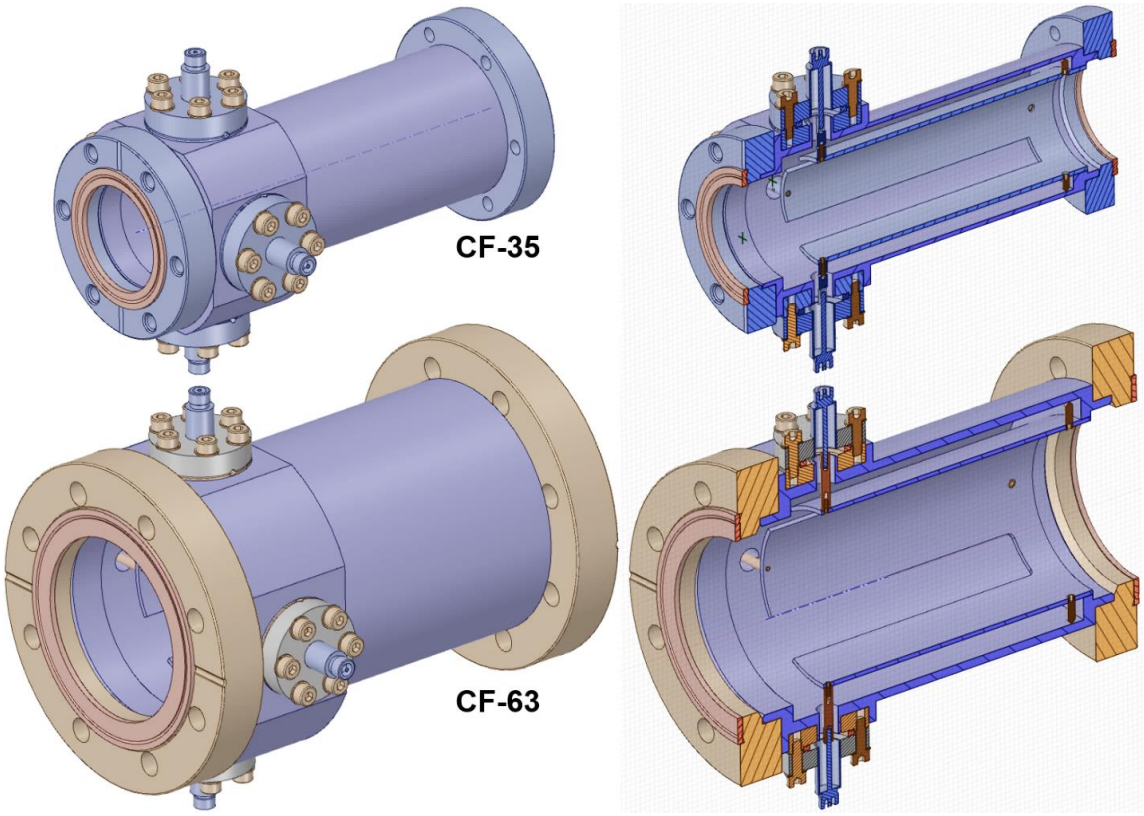


Рисунок 2.4.17 – Разработанные трехмерные модели короткозамкнутых полосковых ДПП

На основе 3D-модели был собран опытный образец датчика апертурой 35 мм для проведения испытаний на ЛУ ИЯИ РАН (Рисунок 2.4.18). Электроды вырезаны из цилиндра с толщиной стенки 1.5 мм и имеют общую часть для обеспечения механической прочности. Длина электродов составляет 100 мм, общая длина сборки по фланцам – 155 мм. Контакты электродов с корпусом осуществляются с помощью установочных конусообразных винтов, расположенных на границе отдельных электродов и общей части для минимизации влияния общей части на чувствительность датчика. Передача сигналов с электродов на сигнальные SMA-разъёмы осуществляется с помощью цанговых контактов из бронзы.

Рисунок 2.4.18 – Изготовленный образец полоскового датчика положения пучка

Лабораторные испытания ДПП

Для анализа основных рабочих характеристик датчика использовался векторный анализатор цепей Planar C1409 (Рисунок 2.4.19).

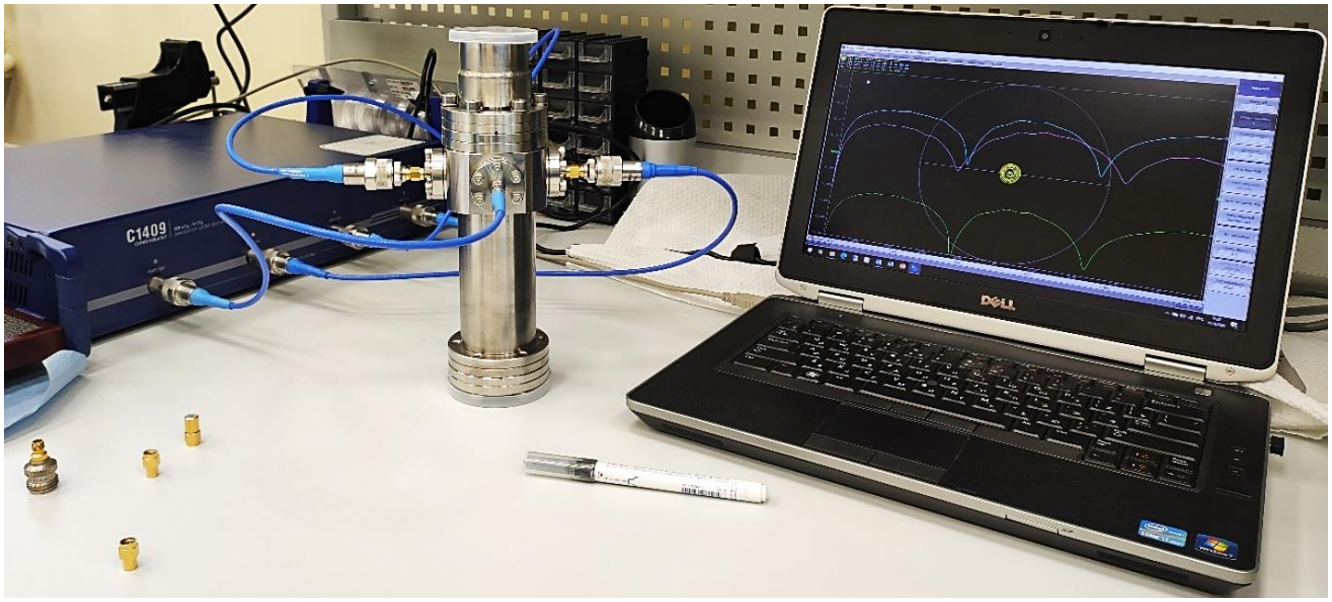
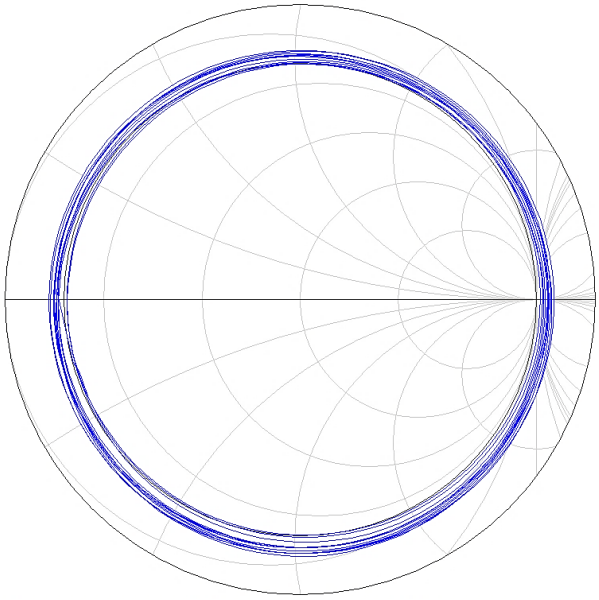


Рисунок 2.4.19 – Фотография стенда для исследование электродинамических параметров ДПП с помощью векторного анализатора цепей Planar C1409

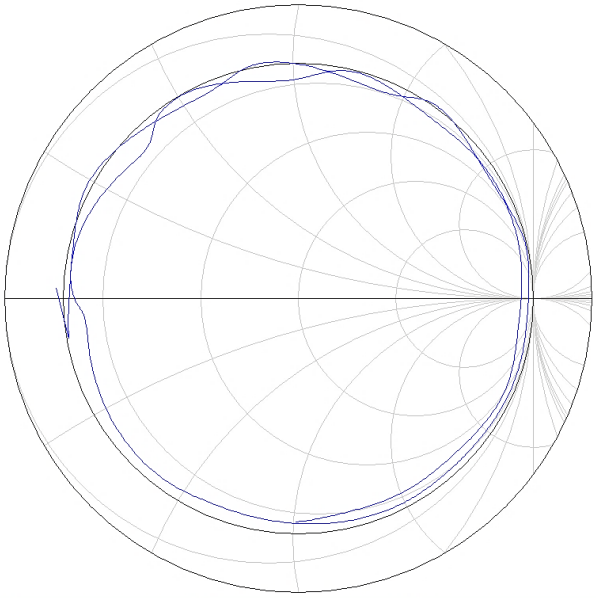
Далее представлены результаты комплексного анализа электромагнитных параметров полоскового датчика, включающего четыре этапа: частотный анализ S-параметров с помощью векторного анализатора и построение диаграмм Смита

для оценки согласования и фазовых характеристик; измерение взаимных S-параметров между электродами с целью количественной оценки емкостных связей; определение смещения электрического центра относительно геометрического по методике Ламбертсона; а также проверка согласования полосковых линий и разъёмов во временной области.

На рисунке 2.4.20 представлены диаграммы Смита для калибровочной меры короткого замыкания и для одного из портов ДПП. Так как датчик состоит из короткозамкнутых полосковых линий, то в идеальном случае весь сигнал должен был бы отражаться в измерительный порт, однако из-за взаимных связей между электродами часть сигнала передается в соседние порты, поэтому диаграмма Смита показывает, что сигнал описывает неидеальную окружность.



1.



2.

Рисунок 2.4.20 – 1. Диаграмма Смита для калибровочной меры короткого замыкания 2. Диаграмма Смита для одного из портов ДПП

С помощью анализатора были измерены S-параметры между соседними и противоположными портами датчика. Полученные значения приведены на рисунке 2.4.21. Взаимные связи между соседними электродами не превышают -20 дБ, а между противоположными: -25 дБ. Измеренные S-параметры совпадают с данными, полученными в результате численного моделирования.

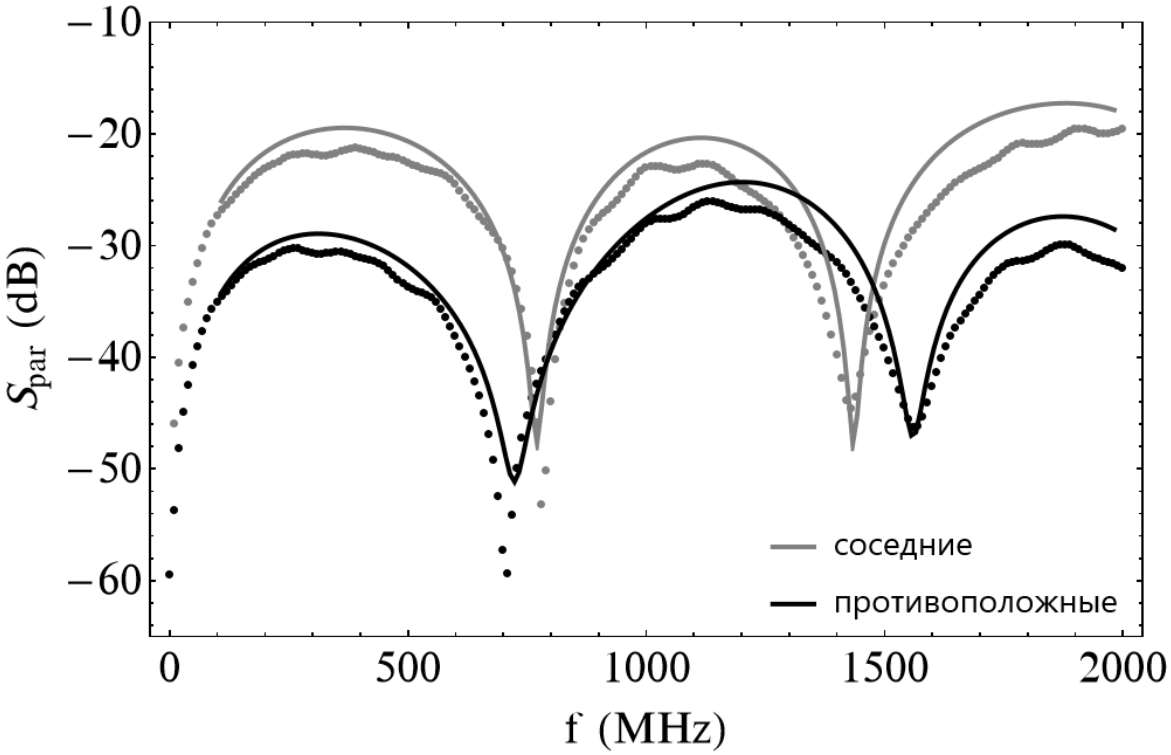


Рисунок 2.4.21 – S-параметры между соседними и противоположными портами ДПП. Точками показаны измеренные значения, линиями – модельные

Последовательно подавая сигнал на каждый из портов и измеряя S-параметры между портами ДПП, можно выявить несимметричности в электрической сборке датчика. Метод, позволяющий определить по этим данным электрическое смещение центра датчика относительно его геометрического центра, называется методом Ламбертсона [131, 132]. Преимущество такого подхода заключается в отсутствии систематических погрешностей, связанных с позиционированием датчика на стенде.

Электрический центр ДПП определяется из условия, что напряжения на противоположных электродах равны (Рисунок 2.4.22):

$$V_1 - V_3 = V_2 - V_4 = 0 \tag{2.4.14}$$

В случае, когда данное равенство выполняется в начале координат, считается, что электрический центр совпадает с геометрическим. Отличие электрического центра от геометрического может появиться при различии коэффициентов прохождений волн по ВЧ-вводам (SMA-разъёмы и полосковые электроды).

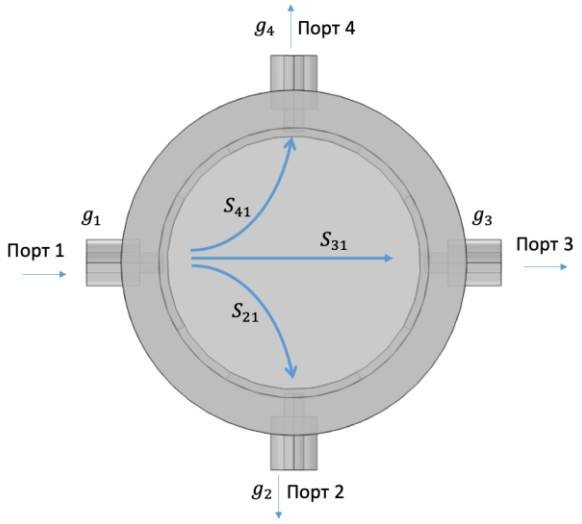


Рисунок 2.4.22 – Схема расположения портов ДПП для определения смещения электрического центра

На рисунке 2.4.23 приведены примеры зависимостей измеренных S-параметров для различных портов датчика от частоты. Зависимость имеет минимумы на частотах порядка 750 и 1500 МГц.

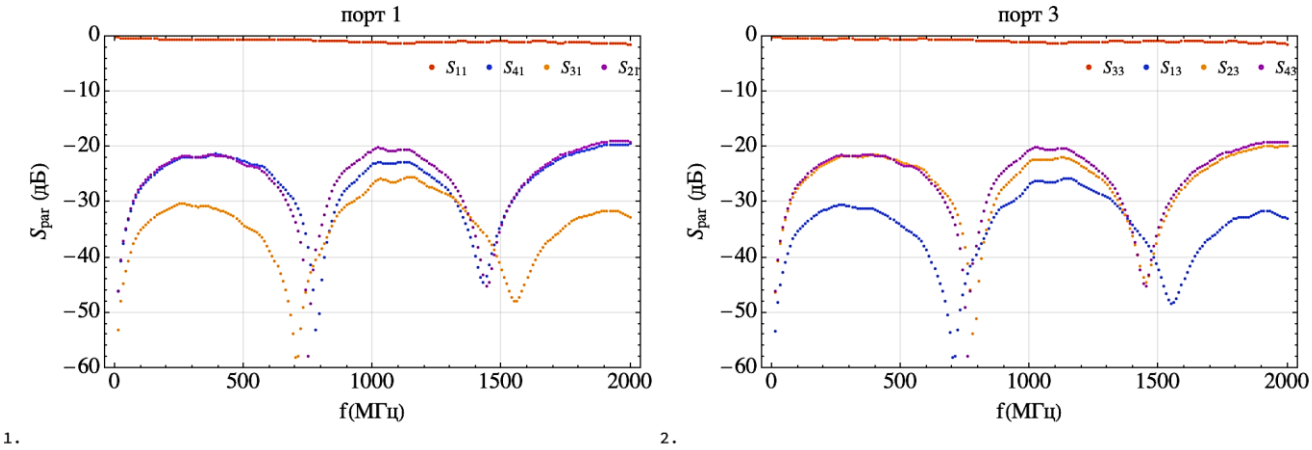


Рисунок 2.4.23 – S-параметры при подаче сигнала на порт 1 или порт 3

На основе данных измерений можно рассчитать матрицу S-параметров между электродами на фиксированных частотах, определяемую соотношением:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \quad (2.4.15)$$

Данную матрицу можно упростить, приняв $S_{ij} = S_{ji}$. Это выражение выполняется из симметрии прохождения сигнала и подтверждается экспериментально (Рисунок 2.4.24)

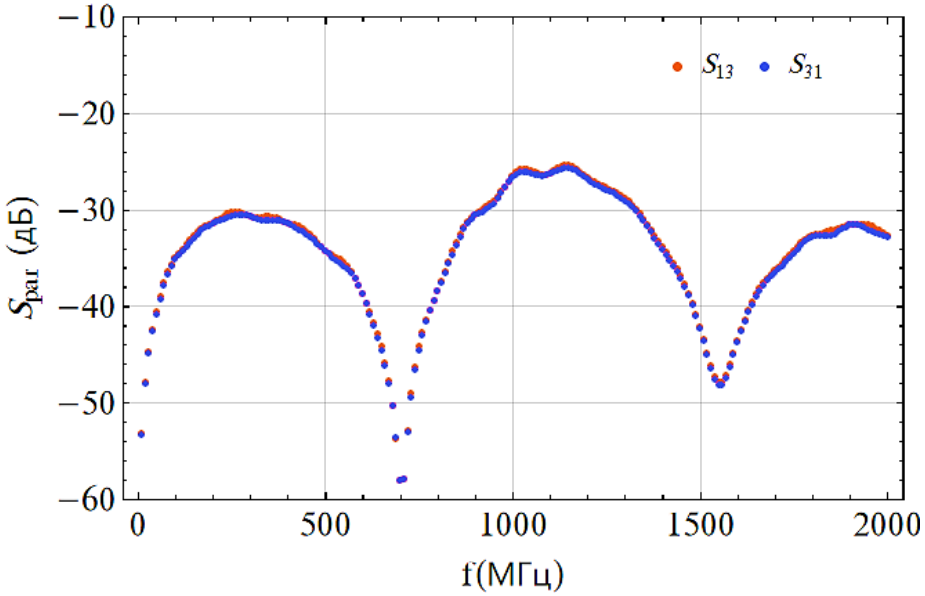


Рисунок 2.4.24 – Измеренные S_{13}, S_{31}-параметры портов ДПП

Чтобы исключить влияние различий в мощности сигналов на портах, нужно нормализовать элементы матрицы:

$$M_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sqrt{S_{ii}S_{jj}}} \tag{2.4.16}$$

Полученная матрица M для третьей гармоники ускоряющей частоты 596.4 МГц имеет вид:

$$M = \begin{pmatrix} 0.937 & 0.061 & 0.012 & 0.054 \\ 0.061 & 0.938 & 0.061 & 0.013 \\ 0.012 & 0.06 & 0.949 & 0.055 \\ 0.054 & 0.013 & 0.055 & 0.937 \end{pmatrix} \tag{2.4.17}$$

При прохождении сигнала через систему разъём – полосковый электрод он ослабляется на величину g_i – коэффициент прохождения i-го порта датчика. Нормализованные S-параметры между электродами пропорциональны произведению коэффициентов прохождения через порты:

$$M_{ij} \approx g_i g_j \tag{2.4.18}$$

Таким образом, решая данную систему уравнений, можно получить нормализованные коэффициенты прохождения через порты, различия в которых будут показывать величину их асимметрии.

Для решения системы применим метод сингулярного разложения $M = U\Sigma V^T$, где Σ – диагональная матрица, а U, V – унитарные. Так как матрица M симметрична и имеет ранг 1, то матрица Σ будет иметь только одно ненулевое значение σ_1. В этом случае векторы g_j можно рассчитать по формуле:

$$g_i \approx \sqrt{\sigma_1} U_i \tag{2.4.19}$$

После расчета коэффициентов, они нормализуются на среднее значение для получения относительных величин. Полученные в результате такого вычисления значения для коэффициентов прохождения портов представлены в таблице 2.4.2.

Таблица 2.4.2 – Рассчитанные коэффициенты прохождения портов

Номер порта	1	2	3	4
Коэффициент прохождения g_i	1.000	1.044	0.996	0.960

Нормализованные разности по горизонтальной и вертикальной осям равны 0.002 и 0.042 соответственно.

Коэффициент прохождения обратно пропорционален удаленности электрического центра от соответствующего порта, благодаря чему можно вычислить координаты электрического центра с использованием модельных чувствительностей датчика в соответствующих плоскостях и измеренных нормализованных разностей сигналов. Модельное значение для чувствительности на 3 гармонике равняется 9.5 %/мм, тогда координаты электрического центра относительно геометрического равны (21, 441) мкм.

Различия в смещениях по двум осям связаны с погрешностями в сборке соединений полосковых электродов и разъемов портов 2 и 4. После выявления данных различий соединения был заменены, что улучшило дальнейшие измерения.

Однако полученное значение электрического центра не может быть напрямую равным значению при практических измерениях с пучком, на которое также влияют характеристики сигнальных кабелей и считывающей электроники.

В ходе лабораторных испытаний также было проведено исследование согласования полосковых линий для проверки расчета ширины зазора, полученного в результате численного моделирования, а также влияния неидеальности итоговой сборки конструкции на согласование линий.

Анализ проводился с помощью метода рефлектометрии во временной области, описанного выше. С помощью векторного анализатора было измерено волновое сопротивление портов ДПП в зависимости от времени. График для двух различных типов разъемов (кривые «порт 1» и «порт 2») и численного расчета представлен на рисунке 2.4.25.

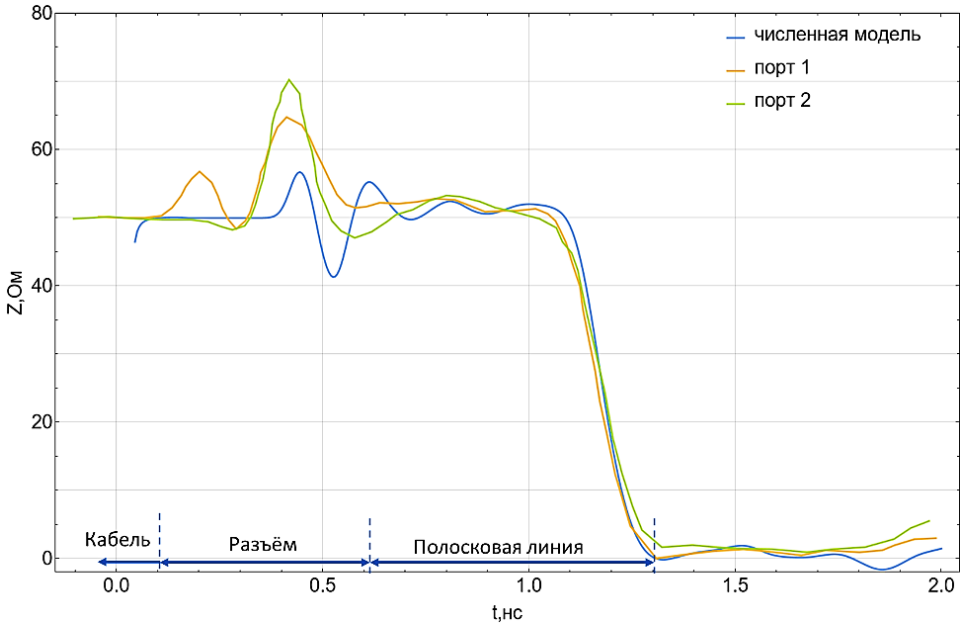


Рисунок 2.4.25 – Измеренное волновое сопротивление линии в зависимости от времени прохождения сигнала в сравнении с численным расчетом

Волновое сопротивление линии равно 50 Ом. Время, за которое импульс проходит по полосковой линии при длине 100 мм, равно $\frac{2l}{c} \approx 0.66$ нс. Измеренное время соответствует численным расчетам. Значительные изменения в волновом сопротивлении происходят при прохождении сигнала через цанговый ВЧ-контакт.

Для имитации прохождения пучка через ДПП был собран тестовый стенд на основе тонкого провода диаметром 60 мкм (рисунок 2.4.26). Итоговая погрешность определения вертикальной и горизонтальной координаты составляла ~25 мкм.

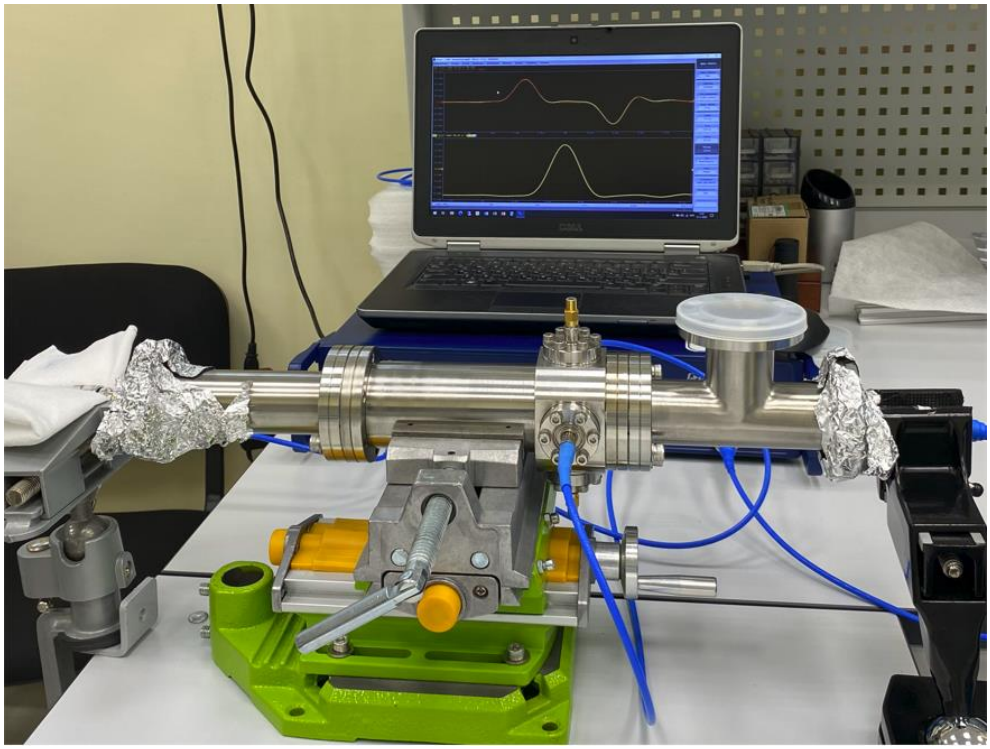


Рисунок 2.4.26 – Стенд с векторным анализатором цепей, ДПП на линейном позиционере и стационарным тонким проводом, проходящим через ДПП

Схема подключения портов приведена на рисунке 2.4.27. На провод (порт 4) подавался сигнал, порты 2 и 3 были подключены к двум противоположным разъемам ДПП, оставшиеся два разъема были нагружены на 50 Ом для корректного согласования. Порт 1 считывал сигнал с противоположного конца провода и использовался для проверки согласования линии прохождения сигнала по проводу.

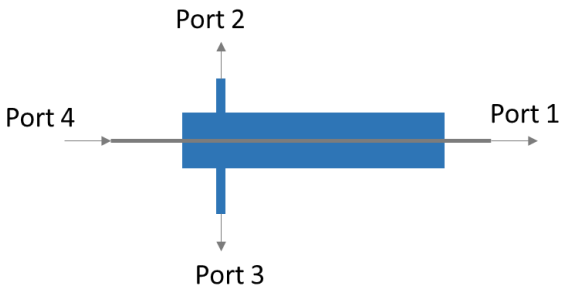


Рисунок 2.4.27 – Схема обозначения портов на тестируемом образце ДПП

С помощью векторного анализатора измерялись коэффициенты прохождения сигнала из порта 4 в порты ДПП S_{34}, S_{24} для различных положений провода и проводился анализ отклика во временной и частотных областях.

Для тестирования линейности отклика ДПП в зависимости от тока пучка были проведены исследования с различной мощностью сигнала, подаваемого на провод (порт 4), в диапазоне от -60 до 15 дБм. Результаты сканирования при нахождении провода в окрестности центра ДПП приведены на рисунке 2.4.28. Во всем диапазоне мощностей подаваемого сигнала ДПП показал линейный отклик.

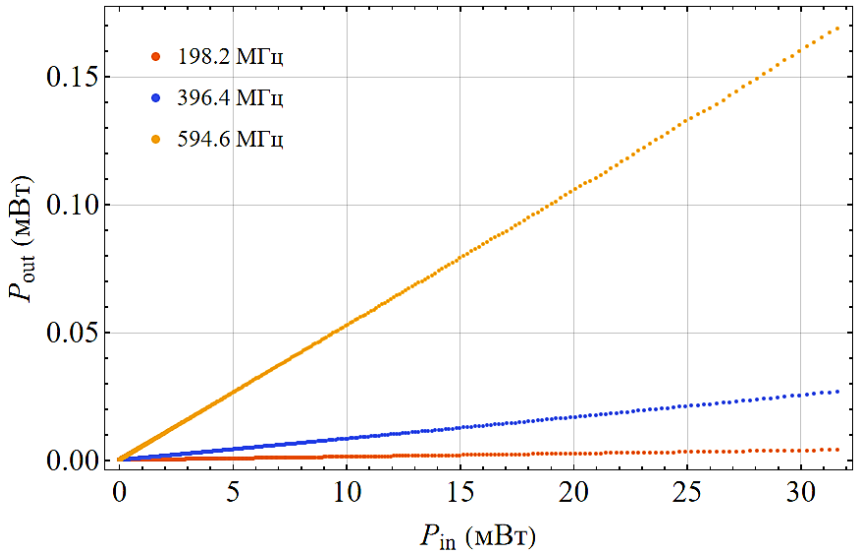


Рисунок 2.4.28 – Зависимость выходной мощности на порте ДПП от поданной мощности на сигнальный провод в геометрическом центре датчика

Также был проведен анализ сигналов во временной области на векторном анализаторе. Пример поданного на провод импульса, приведен на рисунке 2.4.29.

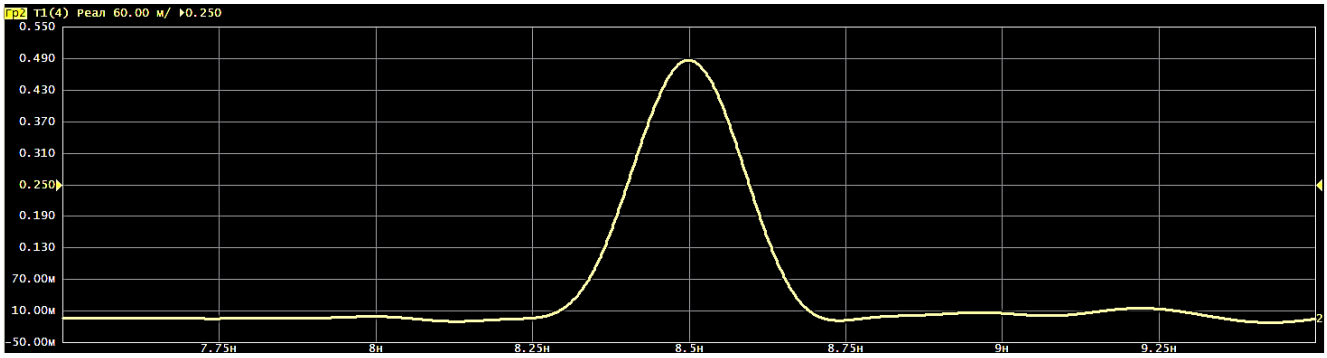


Рисунок 2.4.29 – Импульс, прошедший из порта 4 в порт 1

На рисунке 2.4.30 приведен пример сигналов на противоположных портах датчика во временной области при нахождении сигнального провода в окрестности геометрического центра датчика. Форма каждого из пиков сигнала одинакова для обоих портов и повторяет форму исходного импульса при минимизации отражений импульса в тестовом стенде. Для сравнения полученного сигнала с результатами моделирования входной импульс аппроксимировался функцией Гаусса и подавался на вход модели:

$$V(t) = A\exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right], \tag{2.4.20}$$

где A, σ – амплитуда и длительность импульса.

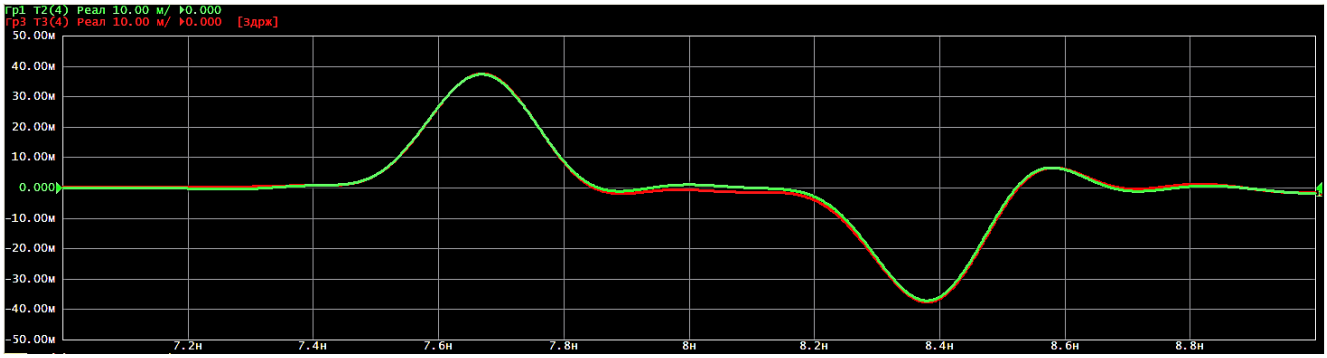


Рисунок 2.4.30 – Сигналы, зарегистрированные на противоположных портах ДПП от провода, расположенного в геометрическом центре датчика

Ширина импульса на полувысоте $s = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma$ может быть рассчитана из данных векторного анализатора цепей по формуле:

$$s = \frac{0.98}{F_{max} - F_{min}}, \tag{2.4.21}$$

где (F_{min}, F_{max}) – частотный диапазон считывания сигнала.

Пример сравнения нормированных сигналов по результатам численного и аналитического расчета с измеренным откликом приведен на рисунке 2.4.31.

Аналогичные сравнения модельных и измеренных на анализаторе сигналов были проведены для сгустков различной длительности. Результаты показаны на рисунке 2.4.32.

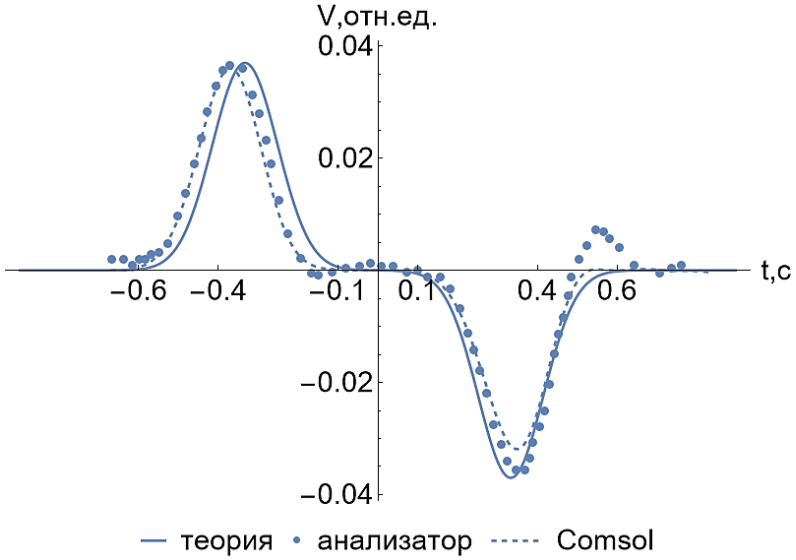


Рисунок 2.4.31– Измеренный нормированный временной отклик ДПП в сравнении с результатами аналитических и численных расчетов

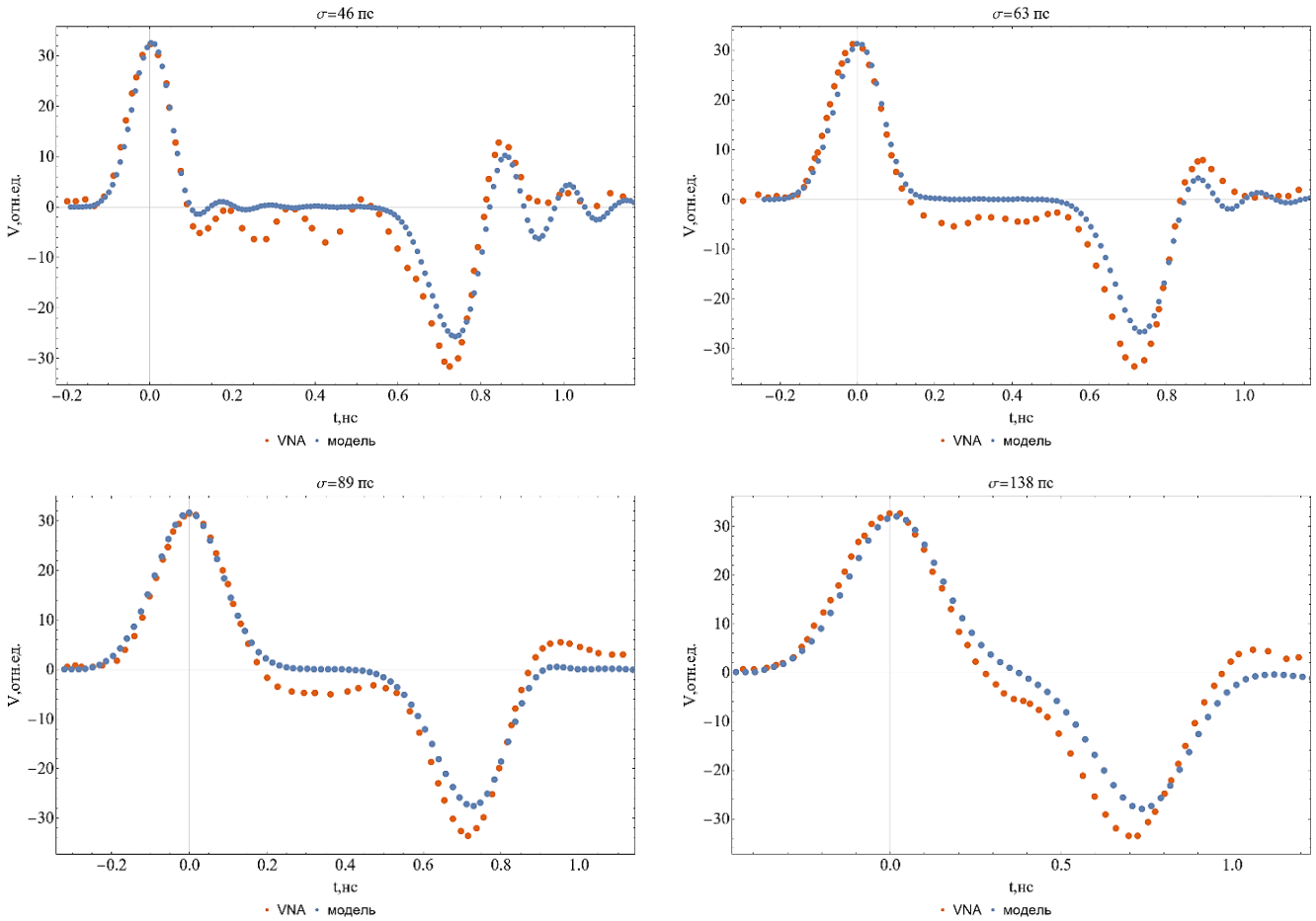
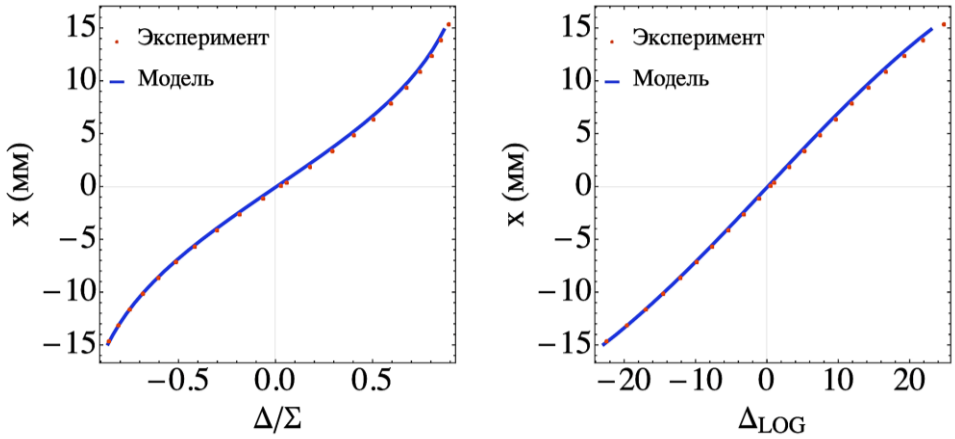


Рисунок 2.4.32 – Сравнение модельных и измеренных сигналов для сгустков разных длительностей

Для экспериментального определения чувствительности, разрешения, области линейности и смещения электрического центра относительно геометрического датчик с помощью линейного позиционера приводился в движение относительно сигнального провода. Расчет характеристик датчика производился в несколько этапов: исследование вблизи геометрического центра, а также полное сканирование положений провода во всей апертуре.

Были определены разрешение и чувствительность датчика при небольших смещениях сигнального провода. Определение чувствительности ДПП проводилось следующим образом. Электрический центр датчика смещался на ось сигнального провода по равенству сигналов с двух горизонтальных портов, и регистрировалось значение S-параметров, после чего датчик сдвигался на фиксированное расстояние 200÷500 мкм, и регистрировались новые значения S-параметров. Измеренные таким образом чувствительности оказались следующими: линейная чувствительность ДПП для обработки методом Δ/Σ s_x= 9.2 %/мм, логарифмическая чувствительность ДПП для логарифмической обработки s_{0x}= 1.6 дБ/мм и не менялись на 1–3 гармониках рабочей частоты. Различия в амплитудах сигналов фиксировались при перемещениях в пределах точности перемещения линейного позиционера ±25 мкм.

Также было проведено измерение сигналов на противоположных электродах в зависимости от положения провода в пределах от -15 до 15 мм. В результате сканирования строились зависимости измеренных положений провода, от его заданных координат. Данные зависимости для 1 гармоники рабочей частоты приведены на рисунке 2.4.33 в сравнении с модельными результатами. Для каждого типа обработки определялась область линейности, в которой ошибка восстановления координаты составляет не более 100 мкм. В линейной области зависимость координаты от разности сигналов аппроксимировалась линейной функцией с помощью метода минимума χ^2. На рисунке 2.4.34 приведено сравнение ошибки восстановления координаты для Δ/Σ-обработки при аппроксимации по точкам в области линейности (кривая «область линейности») и по всем экспериментальным точкам (кривая «вся апертура»).



1. 2.

Рисунок 2.4.33 – 1. Зависимость координаты провода от Δ/Σ. 2. Зависимость координаты провода от логарифмической разности сигналов

Аппроксимация по всем точкам имеет меньшую среднеквадратичную ошибку во всей апертуре, но при этом имеет погрешность в некоторых точках области линейности более 100 мкм.

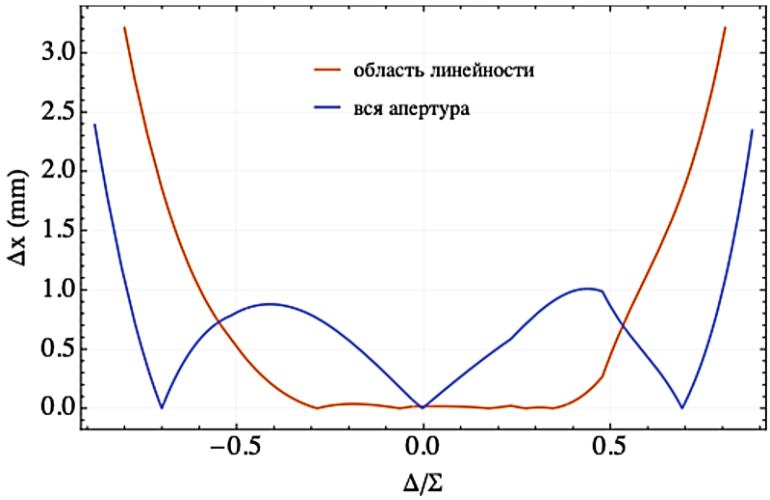
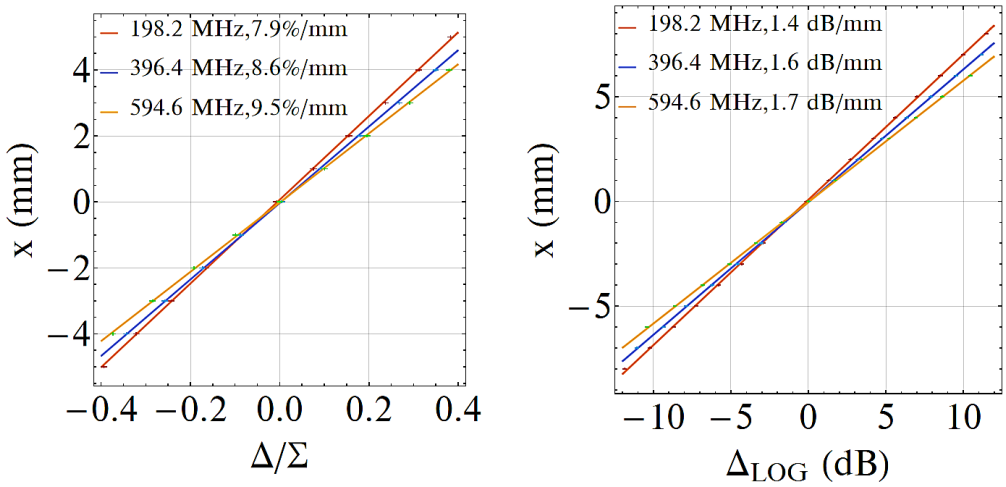


Рисунок 2.4.34 – Разность между рассчитанной и реальной координатой при аппроксимации в области линейности и по всей апертуре

Область линейности для обработки Δ/Σ составила 32% апертуры датчика, а для логарифмической 52%. При этом с увеличением номера гармоники эта область немного уменьшается. Также на 3 гармонике наблюдается наибольшая чувствительность датчика. Для линейной области были определены чувствительность и смещение центра ДПП для трех гармоник ускоряющей частоты (Рисунок 2.4.35).



1. 2.

Рисунок 2.4.35 – Экспериментальное определение чувствительности и смещения в области линейности 1. Для Δ/Σ -обработки. 2. Для логарифмической обработки

В таблицах 2.4.4 и 2.4.5 приведены измеренные по оси *x* параметры для обоих методов обработки сигналов ДПП.

Таблица 2.4.4 – Параметры ДПП для оси *x* при обработке Δ/Σ

	эксперимент			модель		
Номер гармоники	1	2	3	1	2	3
s, %/мм	7.87	8.61	9.52	7.76	8.72	9.64
x_0, мкм	64	-35	-22	0	0	0
Область линейности, мм	±4.9	±4.6	±4.4	±5.4	±4.9	±4.5
Область линейности, % апертуры	31	29	28	34	31	29

Таблица 2.4.5 – Параметры ДПП для оси *x* при логарифмической обработке

	эксперимент			модель		
Номер гармоники	1	2	3	1	2	3
s_0, дБ/мм	1.44	1.58	1.72	1.41	1.59	1.76
x_0, мкм	73	-39	-39	0	0	0
Область линейности, мм	±8.2	±8.0	±7.5	±8.4	±7.9	±7.4
Область линейности, % апертуры	52	51	48	53	50	47

Также были проведены исследования параметров ДПП во временной области для получения широкополосной чувствительности датчика (Рисунок 2.4.36).

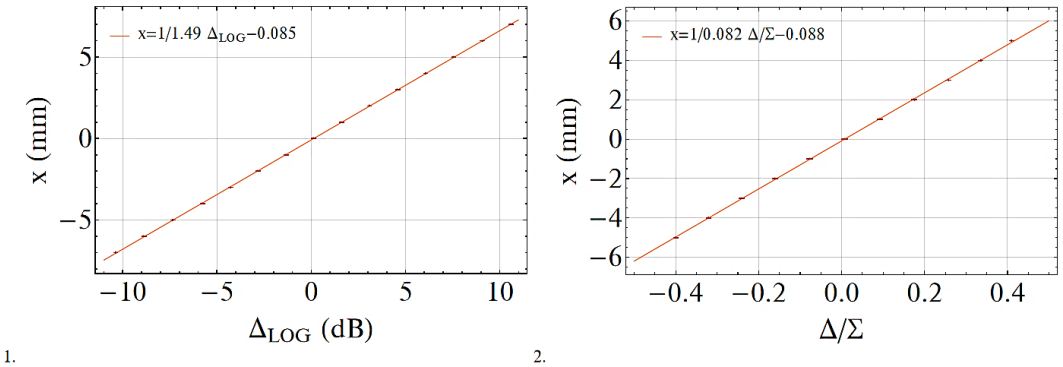


Рисунок 2.4.36 – Экспериментальное определение чувствительности и смещения в области линейности при широкополосном считывании:

1. Для логарифмической обработки. 2. Для Δ/Σ-обработки

Перед установкой датчика на ускоритель была проведена его калибровка совместно с узкополосными малошумящими усилителями (МШУ) 2й и 3й гармоник сигнала с полосой пропускания ± 5 МГц, разработанными ООО «Диалтек» (Дубна).

Также данные дополнительно были аппроксимированы с помощью кубического полинома для расширения линейной области (Рисунок 2.4.37).

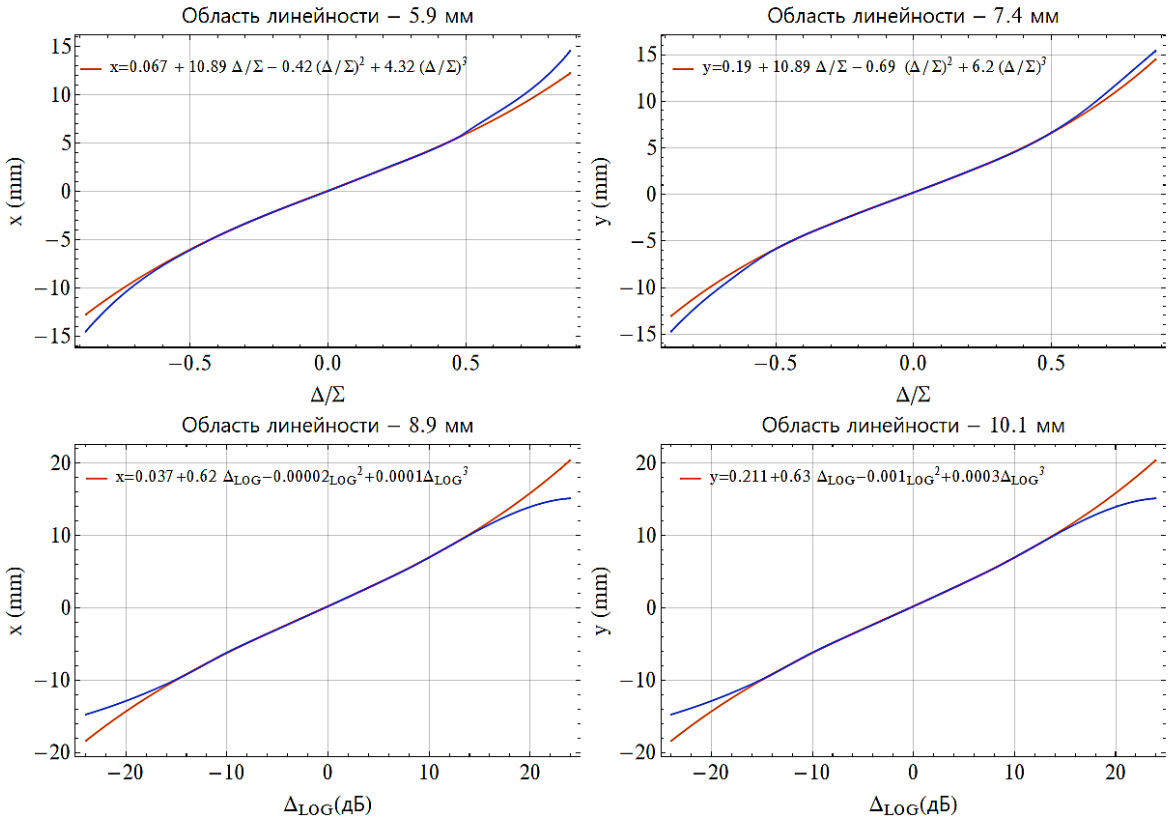


Рисунок 2.4.37 – Результаты сканирования ДПП в полиномиальной обработке

Пучковые испытания ДПП и измерения характеристик пучка

Изготовленный полосковый датчик положения пучка был установлен и испытан на пучке линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН (Рисунок 2.4.38), на выходе 4го резонатора основной части ЛУ, работающего на 5й гармонике частоты следования сгустков: 991 МГц (Рисунок 2.4.39).

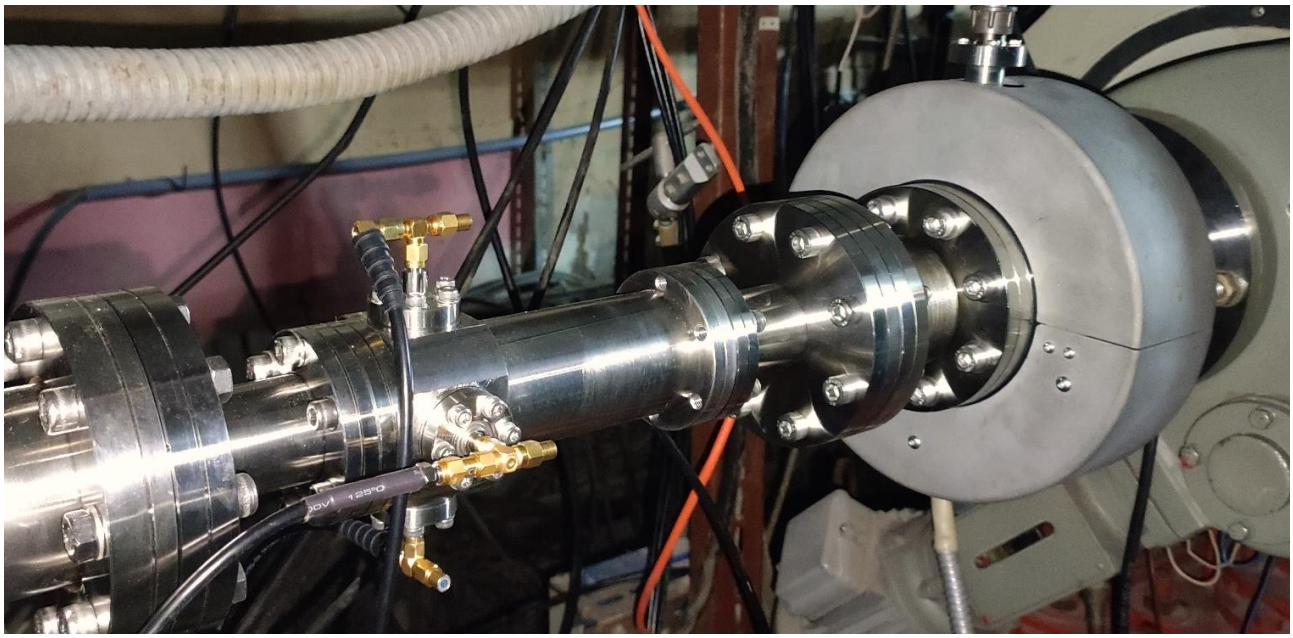


Рисунок 2.4.38 – Разработанный ДПП, установленный на ускорителе ИЯИ РАН рядом с индукционным датчиком тока

Рисунок 2.4.39 – Сигнал ДПП (канал 2) от сгустков пучка, следующих с частотой 198.2 МГц, по отношению к опорному ВЧ-сигналу 991 МГц (канал 3)

Номинальная энергия пучка в месте установки составляла 158.56 МэВ, длительность сгруппированных сгустков ~0.17 нс, а имульсный ток в процессе измерений варьировался от 1 до 8 мА.

Порты ДПП, подключались либо напрямую к цифровому 4-х-канальному осциллографу RIGOL MSO8204, установленному в подвале ЛУ, с помощью стандартных коаксиальных кабелей марки Radiolab RG-58 (рисунок 2.4.40) длиной 25 м, либо к узкополосному МШУ через короткие кабели длиной 0.6 м, а затем выходы МШУ подключались к осциллографу аналогичными длинными кабелями.

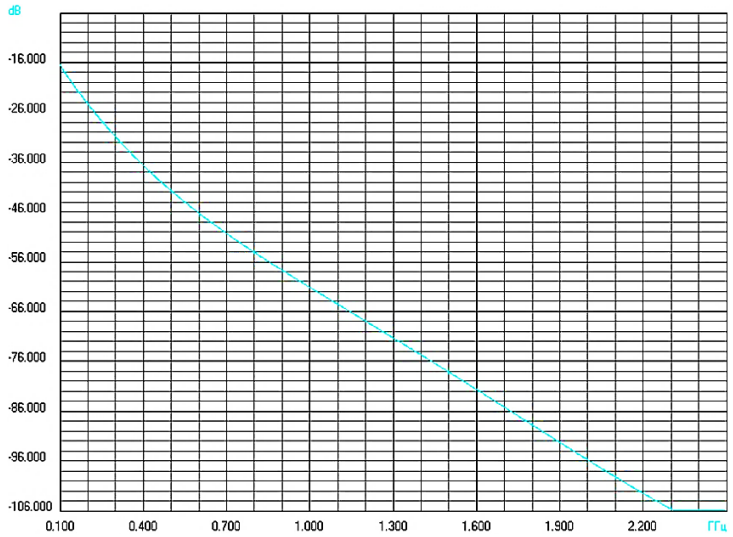


Рисунок 2.4.40 – Спектральная зависимость затухания в использованных сигнальных кабелях марки Radiolab RG-58

На рисунке 2.4.40 показаны типичные сигналы ДПП, полученные при прохождении сгустков протонов длительностью ~170 пс, энергией ~156.56 МэВ и импульсным током пучка ~7 мА при длительности импульса тока ~150 мкс. По каналам 1 и 2 передаются широкополосные сигналы горизонтальных портов ДПП, напрямую подключенных к осциллографу, по каналам 3 и 4 передаются сигналы вертикальных портов ДПП, прошедшие через узкополосный предварительный МШУ 3й гармоники частоты следования сгустков 594.6 МГц. Измеренная амплитуда широкополосного сигнала ДПП для центрированного пучка составила ~14 мВ/мА импульсного тока пучка. Время между противоположными пиками равно ~0.66 нс ≈ $2l/c$.

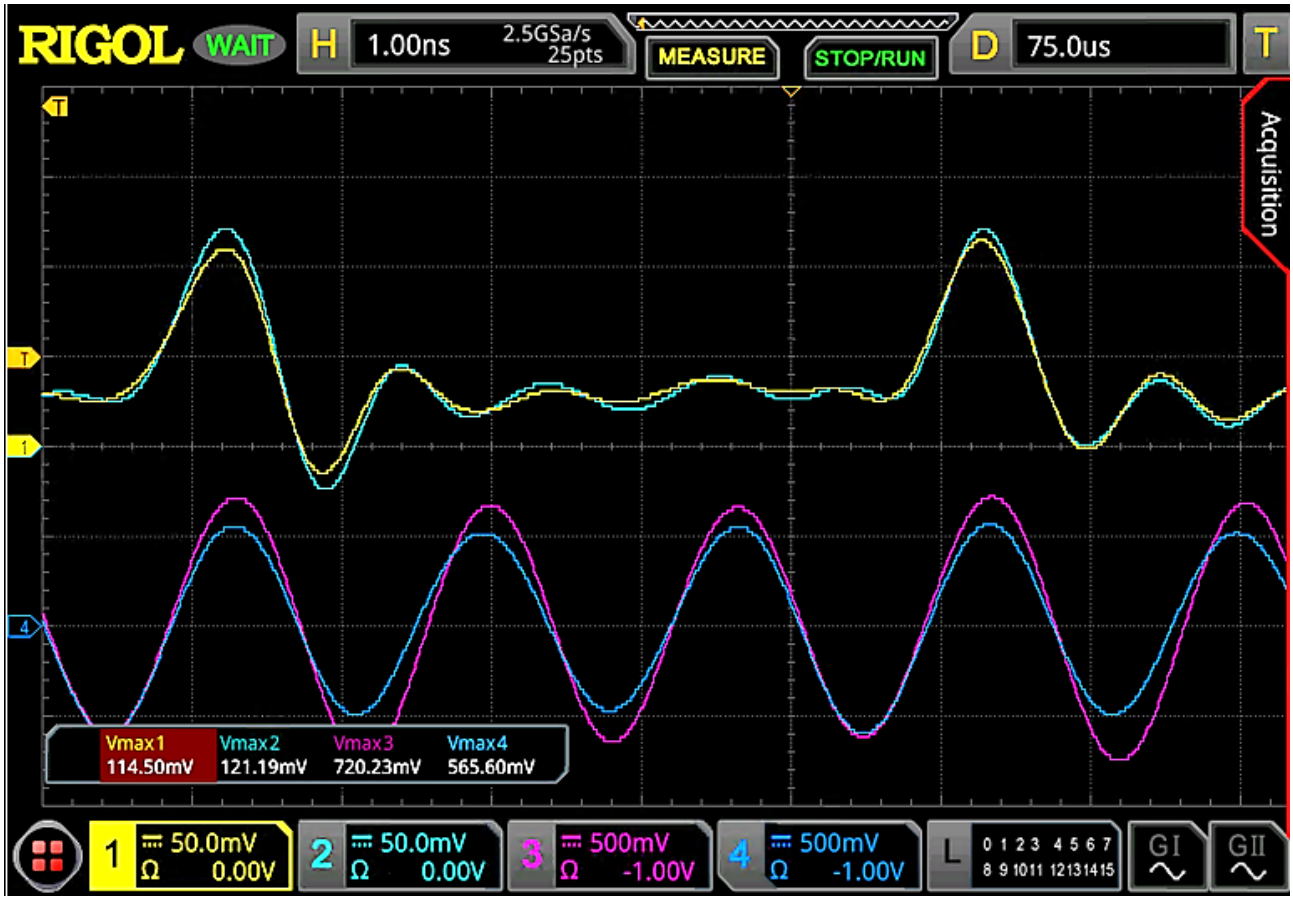


Рисунок 2.4.40 – Пример сигналов ДПП от пучка импульсным током ~7 мА

Усредненная измеренная амплитуда усиленного узкополосного сигнала на 2 гармонике для центрированного пучка, составила ~100 мВ/мА импульсного тока пучка, что с учётом коэффициента усиления ~34.0 дБ (~50.1 раза) и затухания сигнала в длинных соединительных кабелях ~9.1 дБ (~2.9 раза) соответствует ~5.8 мВ/мА исходного сигнала 2й гармоники (расчётное значение ~6.1 мВ/мА).

Усредненная измеренная амплитуда усиленного узкополосного сигнала на 3 гармонике для центрированного пучка, составила ~80 мВ/мА импульсного тока пучка, что с учётом коэффициента усиления ~31.0 дБ (~35.5 раза) и затухания сигнала в длинных соединительных кабелях ~11.4 дБ (~3.7 раза) соответствует ~8.3 мВ/мА исходного сигнала 3й гармоники (расчётное значение ~7.9 мВ/мА).

Таким образом, экспериментальные результаты совпадают с расчетными данными численной физической модели для спектральных зависимостей с точностью ~5%, подтверждая её корректность.

Пространственное разрешение ДПП

Также по данным осциллографа была измерена среднеквадратичная амплитуда суммарного шума системы без пучка для исходного широкополосного сигнала, которая оказалась равной ~ 300 мкВ. Так как отношения коэффициента усиления к коэффициенту шума в используемых МШУ примерно равны, то разрешение для сигналов на обеих гармониках было одинаково и благодаря малым собственным шумам МШУ ухудшалось относительно исходного широкополосного сигнала не более, чем на 10%. На рисунке 2.4.42 приведены значения разрешения, рассчитанного по формуле 2.4.12, для различных амплитуд импульсного тока пучка при измерениях сигнала без усиления и сигнала, усиленного МШУ.

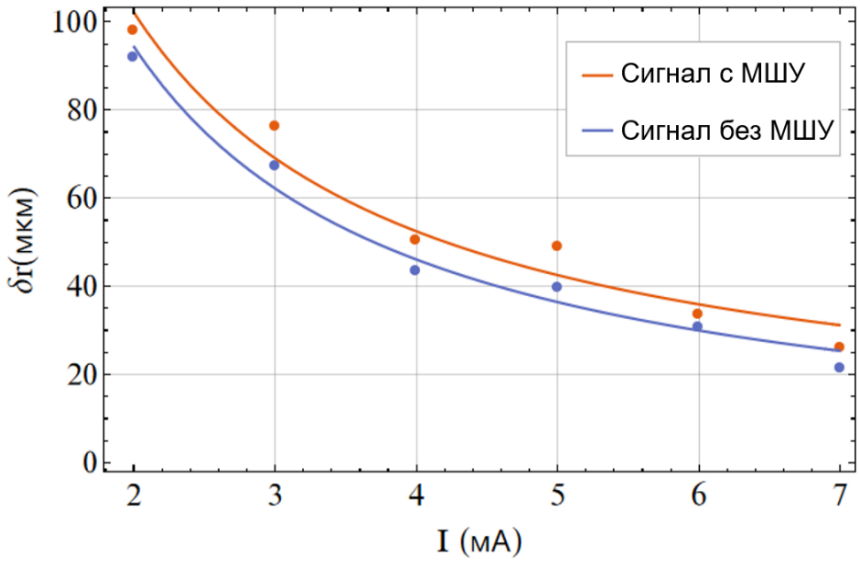


Рисунок 2.4.42 – Разрешение ДПП в зависимости от импульсного тока пучка для измерений широкополосного сигнала без усиления и сигнала, усиленного МШУ.

Времяпролетные измерения на основе ДПП

Также с помощью ДПП, без применения дополнительной электроники, можно проводить времяпролетные измерения средней энергии сгустка.

Например, в ходе испытаний на пучке был измерен сдвиг вершины импульса сигнала ДПП (центр сгустка) ΔT (Рисунок 2.4.43) относительно опорного сигнала ВЧ-системы ЛУ (991 МГц) при выключении резонатора № 3-4, предшествующего ДПП и ускоряющего пучок от 142.81 МэВ до 158.56 МэВ в точке установки ДПП.

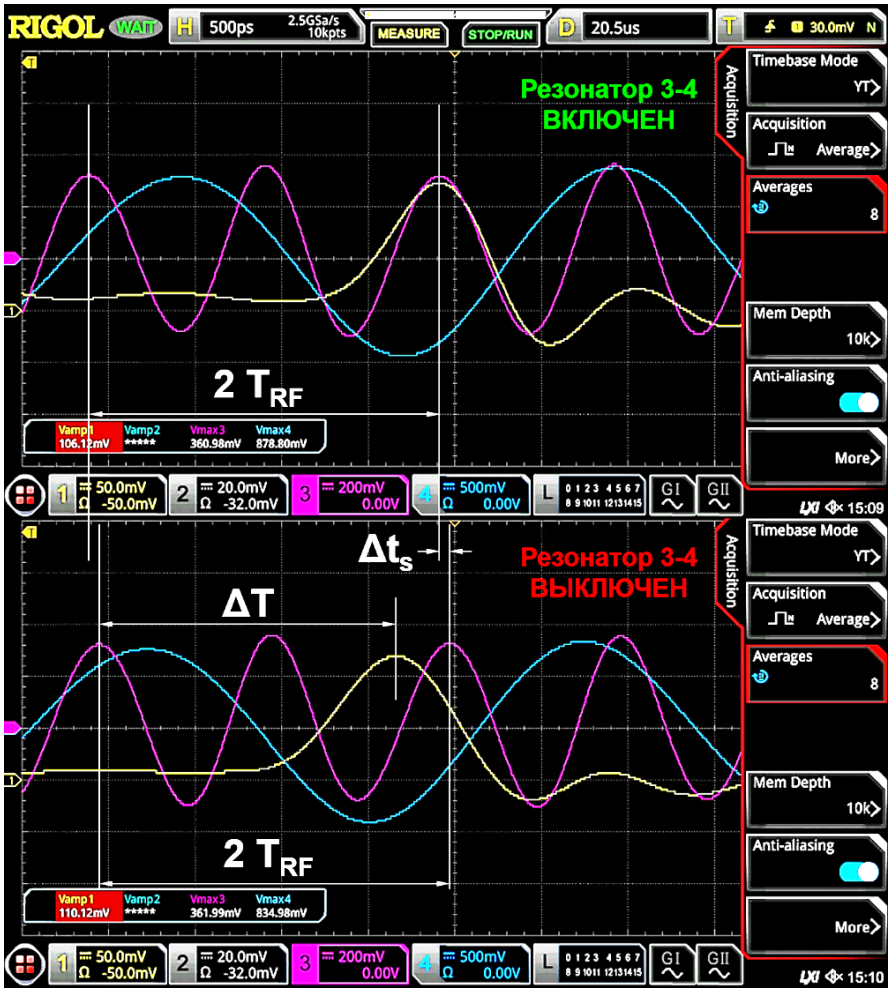


Рисунок 2.4.43 – Сдвиг сигнала ДПП (канал 1) относительно опорного сигнала ВЧ (канал 3) после отключения ускоряющего резонатора, предшествующего ДПП

Расчетная величина разницы времени пролёта пучка с включенным/выключенным резонатором на длине 11270 ± 1 мм от входа в резонатор до точки установки ДПП составляет 1770 ± 5 пс, что соответствует ~1.75 периода колебания опорного сигнала ВЧ T_{RF}. Так как при измерениях осциллограф синхронизировался по сигналу ДПП (из-за чего присутствует общий сдвиг сигналов на Δt_s), то визуально наблюдается сдвиг вершины сигнала ДПП от ближайшего максимума опорного сигнала ВЧ: $2 \cdot T_{RF} - \Delta T$, при этом измеренная величина ΔT составила 1750 ± 20 пс, т.е. соответствует расчётной с точностью ~1%, что подтверждает возможность использования разработанных ДПП для времяпролётных измерений, а в случае применения соответствующих методик I/Q-демодуляции сигнала, и для фазометрических процедур настройки ВЧ резонаторов.

Итоговые эксплуатационные параметры разработанных ДПП

Исходя из результатов расчетов, моделирования и проведенных испытаний, разработанные полосковые короткозамкнутые датчики положения пучка (Рисунок 2.2.44) в совокупности обладают следующими параметрами:

- пространственное разрешение: ~100 мкм для 1 мА импульсного тока пучка;
- область линейности: >50% апертуры;
- широкополосная чувствительность: >15 мВ/мА;
- спектральная чувствительность с МШУ: >100 мВ/мА;
- рабочий диапазон частот следования сгустков: 50 ÷ 1000 МГц;
- присоединительный стандарт: Conflat DN35, DN63, DN100.

Рисунок 2.4.44 – Образцы разработанных полосковых короткозамкнутых ДПП

2.5 *Измерители продольной микроструктуры пучка*

Измеритель формы сгустков (фазовый анализатор)

Измеритель формы сгустков (ИФС), изготавливаемый в ИЯИ РАН [38], предназначен для измерения продольного распределения заряда в сгустках пучка ускоренных заряженных частиц и играет ключевую роль на этапах настройки параметров ускоряющих структур и оптимизации продольной динамики пучка в линейных ускорителях ионов резонансного типа, позволяя проводить уникальную диагностику микроструктуры пучка с фазовым разрешением ~1° на частотах сотни мегагерц вне зависимости от энергии и типа ускоряемых ионов.

В частности, в рамках работ автора по данному направлению подобные измерители были разработаны и изготовлены для таких ускорителей многозарядных ионов, как UNILAC и CW-linac GSI-FAIR (Германия), FRIB MSU (США), линейного ускорителя отрицательных ионов водорода LINAC4 CERN (Швейцария), а также для линейных ускорителей протонов комплексов GSI-FAIR (Германия), ESS (Швеция) и MYRRHA (Бельгия). Индивидуальная разработка под особенности каждого ускорителя и постоянное усовершенствование измерительных возможностей делают прибор востребованным не только на существующих, но и на сооружаемых ускорителях, например, проекты измерителя формы сгустков были разработаны для комплекса электрон-ионного коллайдера DERICA ОИЯИ и нескольких линейных ускорителей ионов РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Конструктивные особенности

В последние годы в связи с повышением требований к точности измерений и эксплуатационным характеристикам диагностического оборудования для современных ускорителей автором были внесены изменения в базовую конфигурацию и конструкцию измерителей [3] (Рисунок 2.5.1). Применение более сложного ВЧ дефлектора вторичных электронов с симметричными полями, а также дополнительной квадрупольной линзы для коррекции траекторий вторичных электронов позволило улучшить фазовое разрешение до предельных значений.

Использование специальной многослойной защиты от внешних магнитных полей позволило практически исключить их влияние на рабочие характеристики приборов и расширить зону возможной установки измерителей на ускорителях. Внесение дополнительного элемента: регулируемой поворотной шторки после дефлектора – позволило расширить диапазон измерений по фазам до полного периода следования анализируемых сгустков, что необходимо для диагностики продольного ореола, а также в ряде случаев в процессе наладки ускорителей, когда сгусток должным образом еще не сформирован.

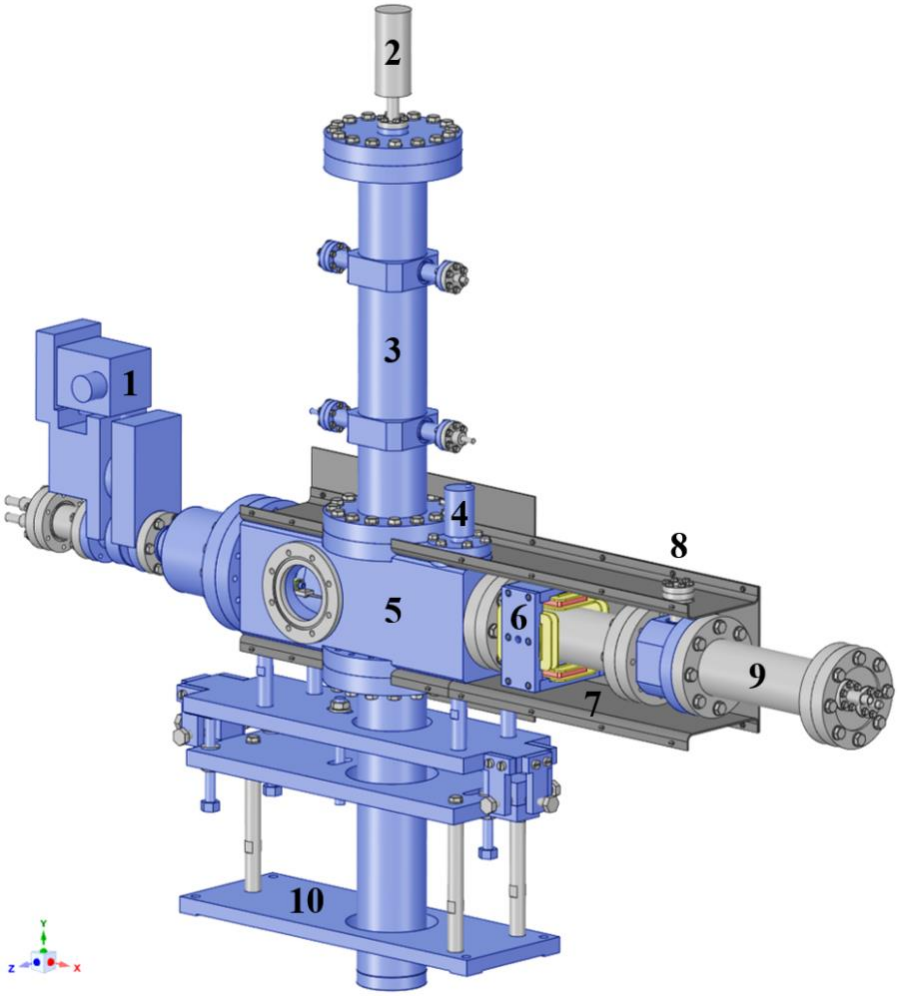


Рисунок 2.5.1 – Трехмерная модель ИФС для Proton LINAC GSI-FAIR: 1 – привод мишени, 2 – элемент тонкой подстройки частоты дефлектора, 3 – симметричный ВЧ-дефлектор, 4 – привод шторки, 5 – основная вакуумная камера, 6 – корректирующий магнит с дипольными и квадрупольными обмотками, 7 – магнитная защита, 8 – контрольное вакуумное окно, 9 – ВЭУ, 10 – юстируемая подставка

ВЧ дефлектор

Основным узлом ИФС является высокочастотный дефлектор (Рисунок 2.5.2), совмещенный с электростатической линзой, который обеспечивает одновременную ВЧ-развертку и фокусировку электронов [21].

Дефлектор представляет собой ВЧ-резонатор на основе двухпроводной линии с ёмкостными пластинами, собственная частота которого определяется длинной штоков. При разработке ИФС можно использовать три типа дефлектора (Рисунок 2.5.2): на основе четвертьволнового (λ/4) и полуволнового дефлекторов (λ/2) работают ИФС с фазовым разрешением до 1°, а симметричный дефлектор полной длины волны (λ), который также может быть выполнен и в полуволновой конфигурации, был разработан (Рисунок 2.5.3) для повышения разрешающей способности измерителей до уровня, ограниченного дисперсией времени вылета электронов вторичной эмиссии [23].

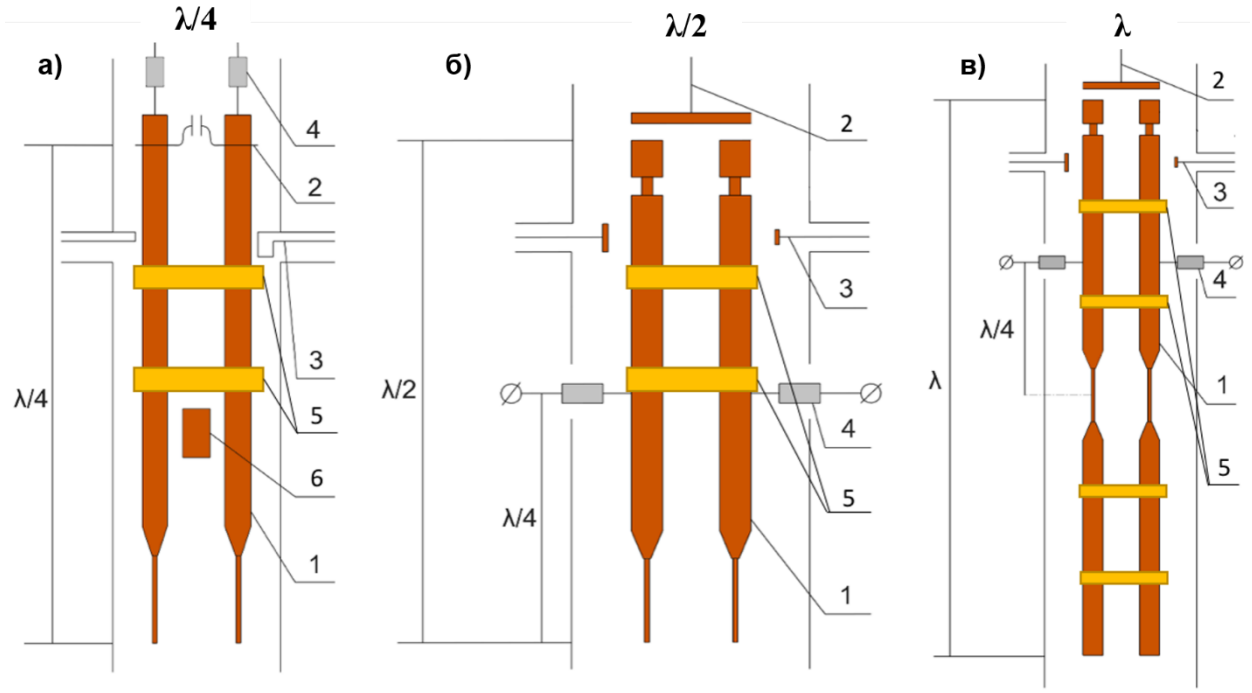


Рисунок 2.5.2 – Схемы дефлектора ИФС: а) λ/4; б) λ/2; в) λ.

1 – электроды, 2 – элемент подстройки частоты, 3 – высокочастотные вводы, 4 – высоковольтные вводы, 5 – керамические изоляторы, 6 – элемент дополнительной подстройки частоты

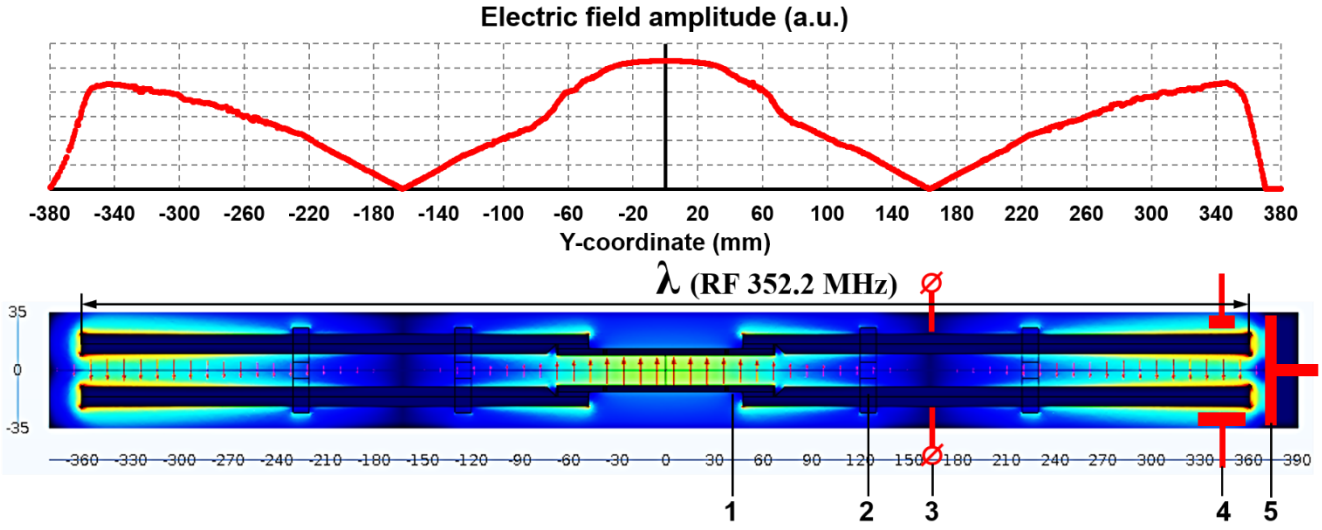


Рисунок 2.5.3 – E_z компонента ВЧ поля вдоль оси симметричного дефлектора ИФС. 1 – пластина, 2 – изолятор, 3 – высоковольтный ввод, 4 – ВЧ ввод, 5 – элемент подстройки резонансной частоты дефлектора

Проблема диагностики продольного распределения заряда в ультракоротких сгустках ионов возникает, например, в линейном ускорителе протонов ESS (Лунд, Швеция), где среднеквадратичный фазовый размер сгустка равен ~1.5°÷2.5° для средних энергий, и ожидается, что он будет еще меньше при высоких энергиях. Для корректных измерений продольной формы пучков с такими короткими длительностями необходимо фазовое разрешение ~ 0.5°, что соответствует временному разрешению ~4 пс для частоты следования сгустков 352.2 МГц.

В случае несимметричных конфигураций дефлекторов в области между пластинами возникают значительные неоднородности отклоняющего ВЧ поля, которые влияют на траектории движения электронов вторичной эмиссии и вносят ошибку в итоговое фазовое разрешение измерителя.

На рисунке 2.5.4 показаны результаты численного моделирования распределения E_z компоненты ВЧ поля в плоскости YZ для несимметричного полуволнового дефлектора и симметричного дефлектора полной длины волны, в случае которого, неоднородность поля в области распространения пучка уменьшается на порядок, до 0.4%.

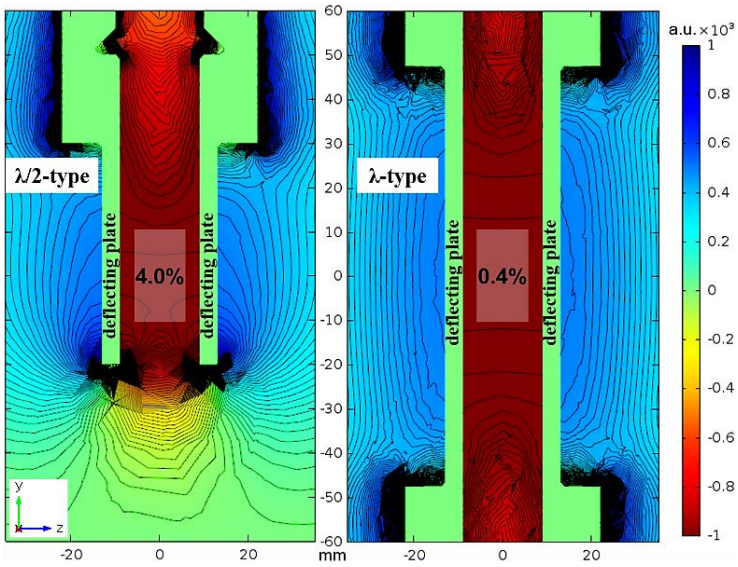


Рисунок 2.5.4 – E_z компонента ВЧ поля между пластинами дефлектора с указанием полученной степени неоднородности в области прохождения вторичных электронов

Магнитная защита и корректор

Достаточно часто измерители формы сгустков устанавливаются в непосредственной близости от элементов магнитооптики ускорителя с сильными краевыми полями. В этом случае необходимо использовать магнитный экран, чтобы обеспечить транспортировку вторичного электронного пучка внутри ИФС без искажений. Впервые такая проблема возникла на ЛУ ионов H^- J-PARC (Япония), где измеритель был установлен внутри квадрупольного дублета (Рисунок 2.5.5).

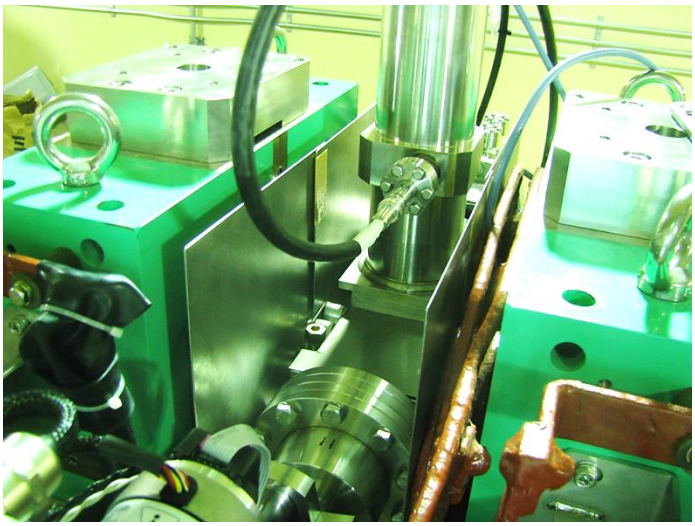


Рисунок 2.5.5 – Фотография ИФС, закрытого по бокам магнитными стальными листами, внутри квадрупольного дублета ЛУ J-PARC

Для последующих конфигураций ИФС был разработан секционный, полностью разбираемый кожух (Рисунок 2.5.6), изготовленный из магнитной стали толщиной 2 мм, внутренние поверхности которого покрываются фольгой из аморфных материалов с высокой магнитной проницаемостью аналогично внешней магнитной защите индукционных датчиков тока.

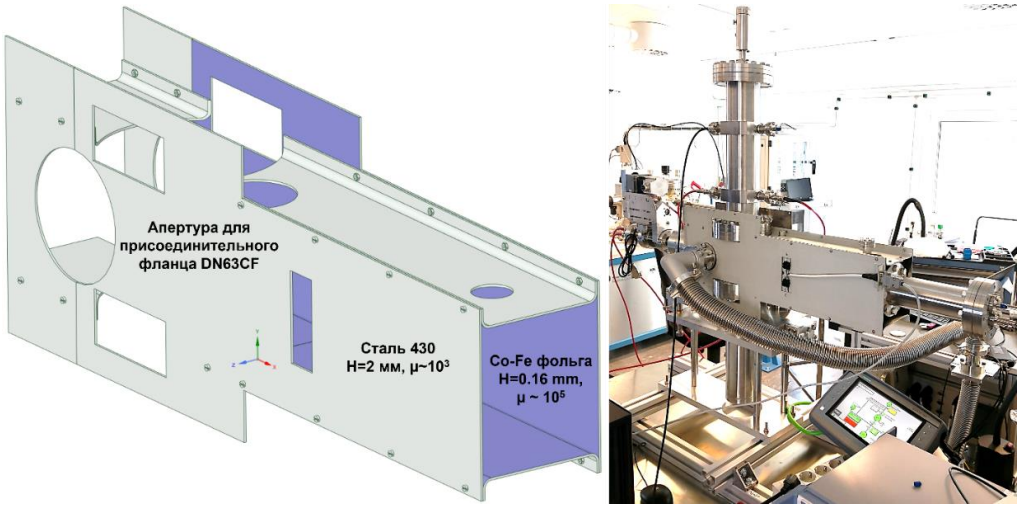


Рисунок 2.5.6 – Трехмерная модель и фотография магнитной защиты ИФС для ESS

В особо критических случаях по бокам кожуха устанавливаются дополнительные магнитные экраны. Оценки эффективности разработанной конфигурации магнитной защиты на примере измерителей, устанавливаемых на ЛУ ESS в непосредственной близости от квадрупольной линзы (Рисунок 2.5.7) и дипольного корректора показаны на рисунке 2.5.8 [29].

Рисунок 2.5.7 – Фотография ИФС, установленного в канале МЕВТ ЛУ ESS

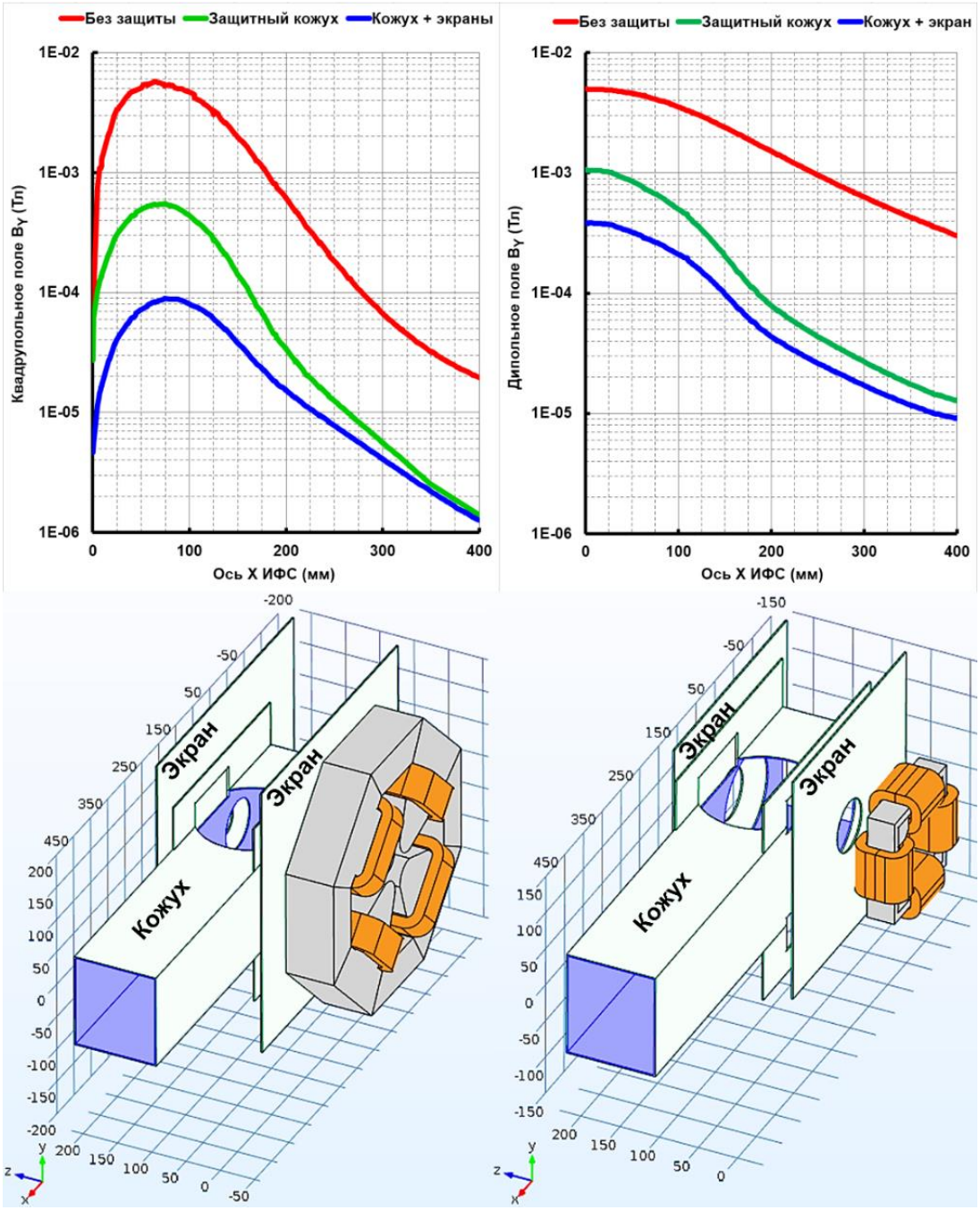


Рисунок 2.5.8 – Результаты моделирования магнитных полей в области ИФС

Заданное краевое поле квадрупольной линзы ослабляется примерно в 50 раз, до величин порядка магнитного поля Земли. Краевое поле дипольного корректора ослабляется примерно вдвое хуже, что ограничивает допустимую индукцию такого поля до величины ~5 мТл. В случае планируемого размещения измерителя в более сильных магнитных полях имеет смысл усиливать магнитную защиту с помощью листов низконикелевого пермаллоя марки 50Н ($\mu \sim 10^4 \div 4 \cdot 10^5$, $B_{max} \sim 1.5$ Тл).

Влияние остаточных статических полей внутри магнитного экрана, а также неизбежных механических смещений в сборке прибора на динамику пучка вторичных электронов могут быть компенсированы в Z-направлении регулировкой корректирующего напряжения в дефлекторе, а в других направлениях – магнитными полями специального корректирующего магнита с комбинацией дипольного и квадрупольного полей, который впервые был применен в ИФС для ЛУ FRIB MSU [24]. Дипольное поле позволяет смещать электронный пучок по оси Y, а квадрупольное – корректировать наклон электронного пучка в плоскости YZ. Эффект действия корректирующего магнита представлен на рисунке 2.5.9.

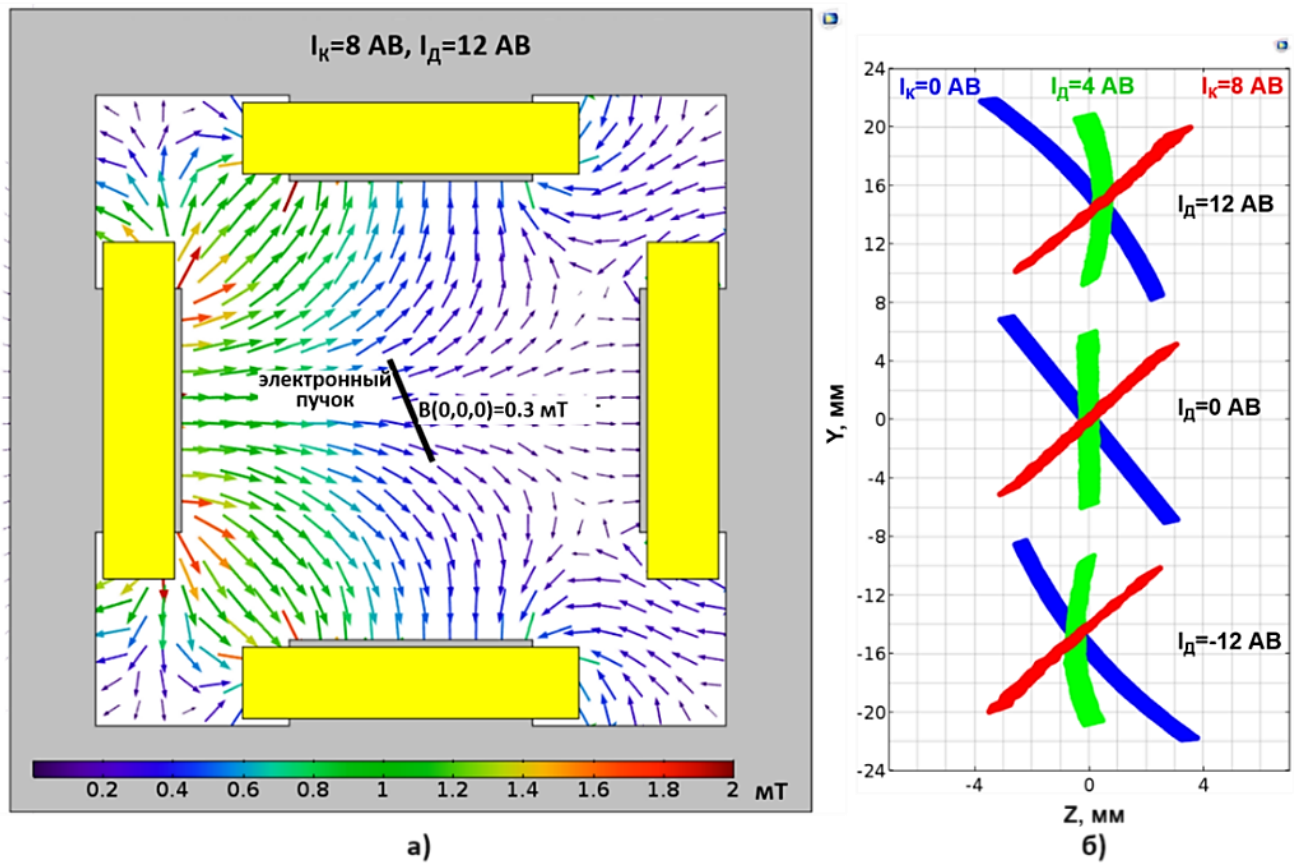


Рисунок 2.5.9 – (а) Пример распределения суммарного магнитного поля в центральной плоскости корректирующего магнита ИФС. (б) Расчетные положения электронного пучка в плоскости выходного коллиматора при разных токах (в ампер-витках) $I_К$ в квадрупольной и $I_Д$ в дипольной обмотках магнита

Поворотная шторка

Если сгусток, включая ореол, имеет фазовую протяженность более 180° на частоте отклоняющего поля, то в измеренном распределении происходит наложение интенсивностей от точек, фазовое положение которых в реальном продольном распределении различается на 180° (на частоте отклоняющего поля). Таким образом, диапазон измерений по фазам в базовой конфигурации ИФС ограничен половиной периода, поэтому для его расширения до 360° предусмотрен дополнительный элемент – поворотная шторка на выходе дефлектора, принцип действия которой поясняется на рисунке 2.5.10, где показаны траектории электронов, проходящих через выходной коллиматор при разных амплитудах отклоняющего поля и сдвинутых по фазе на 180°.

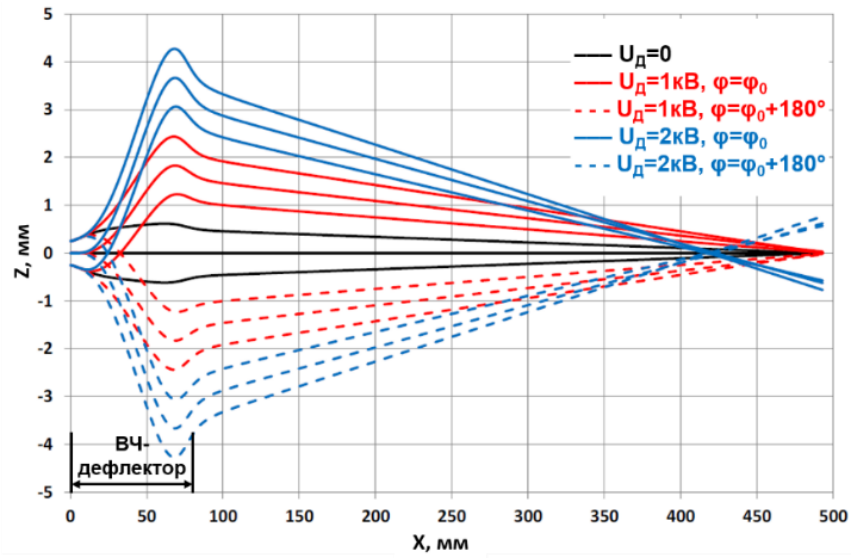


Рисунок 2.5.10 – Траектории электронов между входным и выходным коллиматорами

При достаточно больших амплитудах происходит полное пространственное разделение двух групп электронов, сдвинутых по фазе на 180°, на выходе дефлектора. Установив после дефлектора шторку, задерживающую одну из групп, можно исключить суперпозицию сигналов, сдвинутых по фазе на половину периода. При этом происходит расширение фазового диапазона измерений до полного периода отклоняющего ВЧ поля, равного периоду следования сгустков.

Данная методика была предложена А. В. Фещенко и А. М. Тронем ещё в начале 1980-х годов, однако идея так и не была доведена до практической реализации.

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик

Основной характеристикой измерителя формы сгустков является фазовое разрешение, под которым понимается полная ширина на половине максимума полученной функции распределения при измерении формы сгустка ионов с продольным распределением плотности заряда в виде δ-функции. Конечное значение фазового разрешения определяет сглаживание измеряемой формы сгустка, из-за чего теряется тонкая структура фазового распределения частиц.

Как было показано выше в Главе 1, координата сфокусированных электронов в плоскости выходного коллиматора определяется следующей формулой:

$$Z = Z_0 + Z_{max} sin\varphi. \tag{2.5.1}$$

После дифференцирования формулы 2.5.1 по фазе, получаем зависимость $\Delta Z = Z_{max} cos\varphi \cdot \Delta\varphi$. Тогда, предполагая, что ΔZ является полной шириной на половине максимума отклика измерителя на сгусток в виде δ-функции, фазовое разрешение может быть записано в виде:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta Z}{Z_{max}\cos(\varphi)}. \tag{2.5.2}$$

Подставляя φ из 1.6.2 для $Z=Z_К$ можно выразить фазовое разрешение, как:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta Z}{Z_{max}\sqrt{1-\frac{(Z_К - Z_0)^2}{Z_{max}^2}}}. \tag{2.5.3}$$

Следует учесть, что фазовое разрешение изменяется при регулировке корректирующего напряжения. Наилучшее значение достигается, если при выключенном отклоняющем ВЧ поле электроны попадают строго в щель выходного коллиматора ($Z_К = Z_0$). В этом случае:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta Z}{Z_{макс}} \approx \frac{2\sigma_z}{Z_{макс}}, \tag{2.5.4}$$

где σ_z – среднеквадратичный поперечный размер электронного пучка, который определяется различными параметрами, включая характеристики измерителя и свойства вторичных низкоэнергетических электронов.

Для расчета разрешающей способности измерителя была построена численная физическая модель, в которой электроны вторичной эмиссии вылетали с поверхности проволочной мишени с учетом типичных распределений по энергиям и углам вылета [133].

На рисунке 2.5.11 показаны расчетные поперечные сечения электронного пучка, прошедшего щель входного коллиматора шириной 0.5 мм, в плоскости выходного коллиматора в процессе оптимизации фокусирующего потенциала.

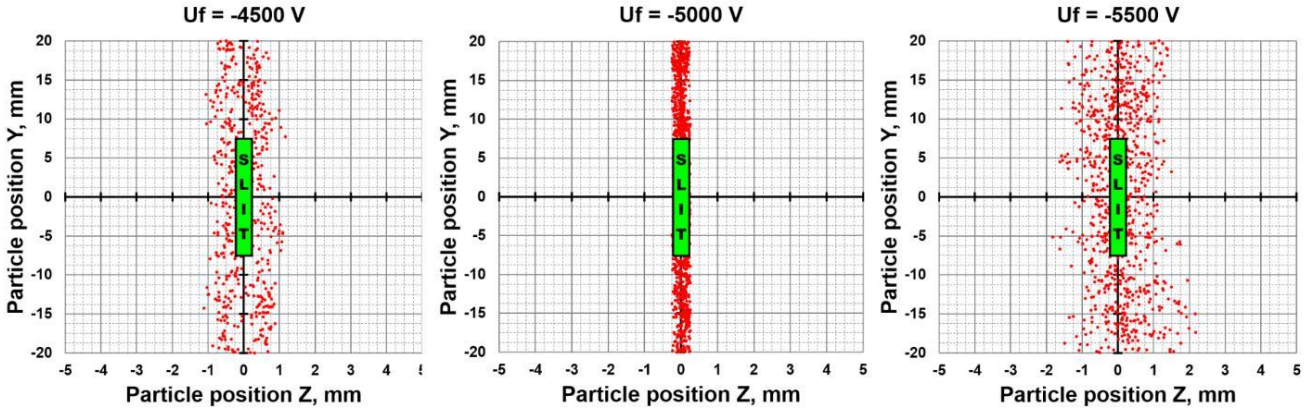


Рисунок 2.5.11 – Поперечные сечения электронного пучка в плоскости выходного коллиматора для различных фокусирующих потенциалов дефлектора ИФС

При включении ВЧ поля дефлектора электроны отклоняются, и их координата в плоскости выходного коллиматора становится зависимой от фазы отклоняющего поля. Геометрия симметричного дефлектора полной длины волны ИФС ESS была специально подобрана для достижения максимальной амплитуды смещения Z_{max} при фиксированной амплитуде ВЧ поля между пластинами дефлектора. Для отклоняющего потенциала U_d=1000 В, значение Z_{max} равно 68 мм.

На рисунке 2.5.12 показаны поперечные сечения пучков вторичных электронов с наилучшей фокусировкой в плоскости выходного коллиматора для случая трех различных фаз отклоняющего ВЧ поля, следующих с интервалом 0.5°. Результаты моделирования демонстрируют полное разделение пучков, что подтверждает фазовое разрешение 0.5° при использовании щели выходного коллиматора шириной 0.5 мм.

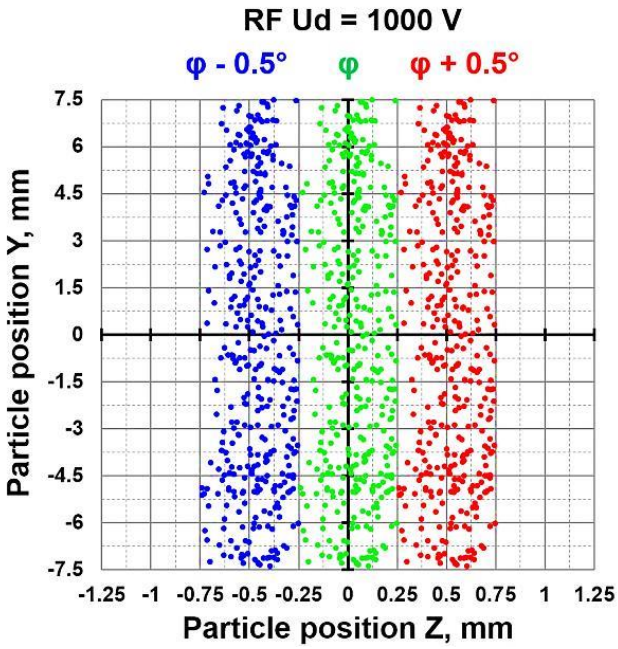


Рисунок 2.5.12 – Поперечные сечения пучка электронов в плоскости выходного коллиматора при разных фазах отклоняющего ВЧ поля дефлектора ИФС

Однако достигнутый в модели удвоенный среднеквадратичный размер пучка равен ~ 0.25 мм. Таким образом, размер щели выходного коллиматора может быть уменьшен до 0.25 мм с целью улучшения разрешения до $^{360^\circ}/_{2\pi} \cdot {}^{0.25}/_{68} = 0.21^\circ$.

Однако на практике такое уменьшение ширины щели нецелесообразно. Первая, очевидная, причина состоит в том, что уменьшение размера щели приведет к уменьшению интенсивности электронного пучка, а вторая, критически важная, причина – дисперсия времени или задержка вылета низкоэнергетических электронов вторичной эмиссии из поверхности металлов.

Значение временной дисперсии вторичных электронов точно не известно. Теоретическое значение временной дисперсии для металлов оценивается как 0.01 пс [133]. При этом лучшее экспериментальное измерение этой величины, представленное в [134], дает верхний предел, равный 4 ± 2 пс. Предполагая задержку вторичной эмиссии равномерно распределенной от 0 до 6 пс, можно оценить двойное среднеквадратичное отклонение как $^{2 \cdot 6}/_{2\sqrt{3}} \approx 3.46$ пс, что соответствует фазовому разрешению 0.43° для частоты 352.2 МГц.

Суммируя эти два вклада: расчётное собственное разрешение прибора и экспериментально измеренное физическое фундаментальное свойство процесса вторичной эмиссии электронов из поверхности металлов – можно оценить результирующее фазовое разрешение измерителя как $\sqrt{0.21^2 + 0.43^2} = 0.48°$.

Помимо фазового разрешения существует и так называемая ошибка отсчета фазы, основная причина которой – модуляция времени пролета электронов от мишени до дефлектора полем пространственного заряда сгустков анализируемого пучка [135]. Пространственный заряд также влияет и на фазовое разрешение, однако заметное влияние на точность измерений продольного распределения появляется лишь при токах пучка несколько десятков миллиампер (Рисунок 2.5.13).

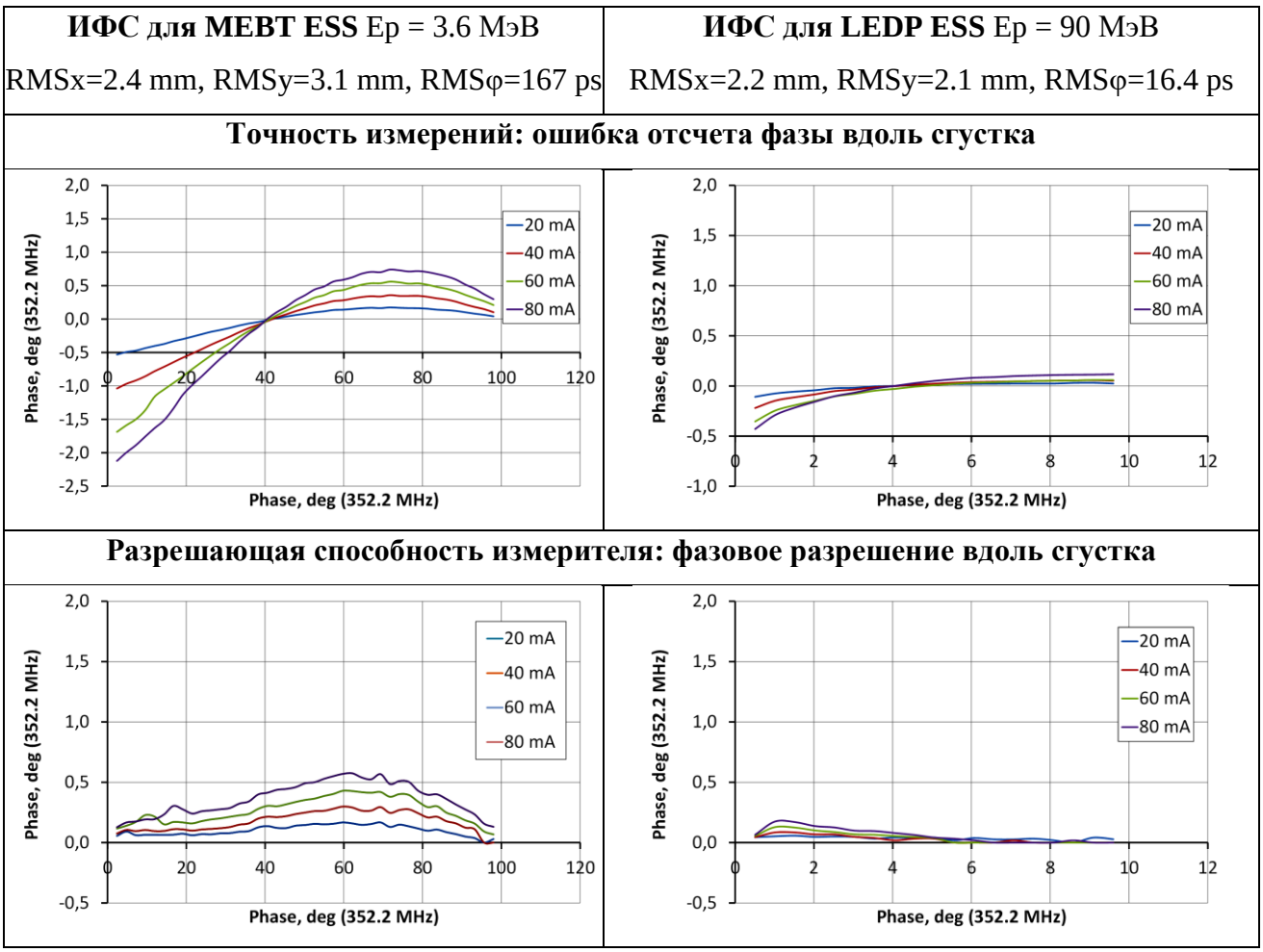


Рисунок 2.5.13 – Оценки ошибок отсчета фазы и фазового разрешения ИФС ESS под влиянием пространственного заряда пучка

Ещё одним важным параметром ИФС, подлежащим предварительным численным оценкам, является устойчивость проволочной мишени к тепловым нагрузкам под воздействием анализируемого пучка. Фактически, допустимые тепловые нагрузки мишени аналогичны случаю проволочных сканеров и многопроволочных профилометров, поэтому ИФС может использоваться при тех же интенсивностях пучка, что и другие профилометры, установленные на ускорителе. Для каждого конкретного случая проводятся оценки тепловых нагрузок по авторской методике, изложенной в разделе 2.2, и составляются диаграммы допустимых параметров пучка, примеры для пучков протонов GSI-FAIR и многозарядных ионов FRIB MSU [24] приведены на рисунке 2.5.14.

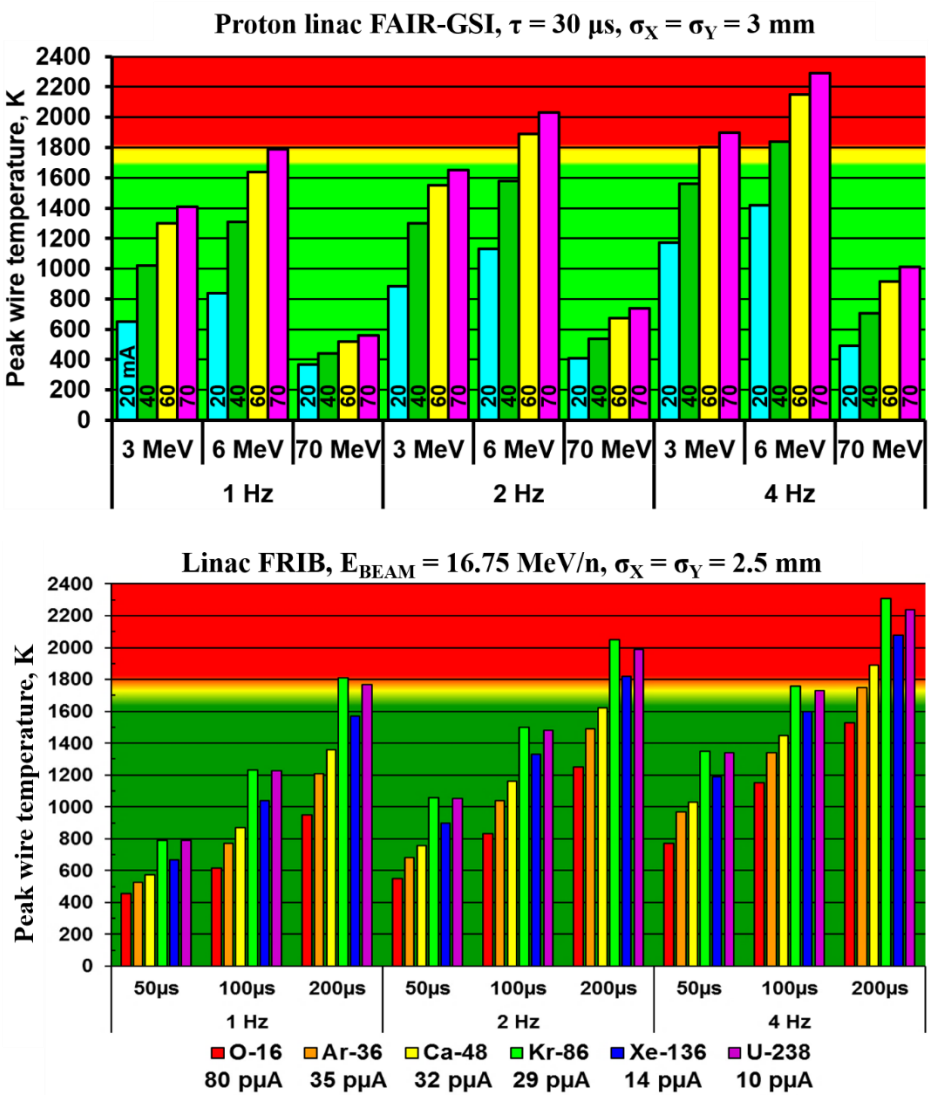


Рисунок 2.5.14 – Примеры расчетных оценок пиковых температур мишени ИФС

Параметры электроники

Измеритель поставляется в комплекте с блоками высоковольтных источников, предусилительной и управляющей электроники в 19” формате. Основной крейт (Рисунок 2.5.15) электроники высотой 4U содержит в себе набор индивидуальных ячеек для управления и контроля всеми узлами измерителя: напряжение ВЧ-фазовращателей, напряжение и ток мишени, фокусирующее и корректирующее напряжения дефлектора, токи магнитов, напряжение вторично-электронного умножителя, также на входы крейта поступают опорный ВЧ-сигнал, синхроимпульс и основной измеряемый сигнал с выхода ВЭУ, предварительно усиленный трансимпедансным усилителем, закрепленным на корпусе измерителя. Крейт сконструирован таким образом, что в совокупности с крейтом высоковольтных источников и крейтом управления шаговым двигателем привода мишени, позволяет осуществлять настройку и работу с ИФС без какой-либо дополнительной управляющей электроники, что оказывается удобным на практике при проведении лабораторных тестов на основе пучка термоэлектронов. Для полноценной удаленной работы с измерителем крейт соединяется многожильными кабельными сборками с крейтом управляющей электроники, и работа с ИФС ведется в удобном и многофункциональном ПО на основе платформы LabVIEW.

Рисунок 2.5.15 – Основной крейт электроники измерителя формы сгустков

Лабораторные испытания измерителя формы сгустков

В разработанных измерителях предусмотрена возможность наладки электронно-оптического канала по пучку термоэлектронов. Нагревая мишень с помощью пропускания через неё электрического тока ~1 А, можно получить поток термоэлектронов, имитирующих вторичные электроны. Положение и поперечное сечение термоэлектронного пучка можно визуально наблюдать через смотровые окна на люминофоре, покрывающем пластины входного и выходного коллиматоров. Например, результаты лабораторных испытаний измерителя для ESS (Рисунок 2.5.16) показали, что термоэлектронный пучок может быть полностью сфокусирован в щель выходного коллиматора шириной 0.5 мм.

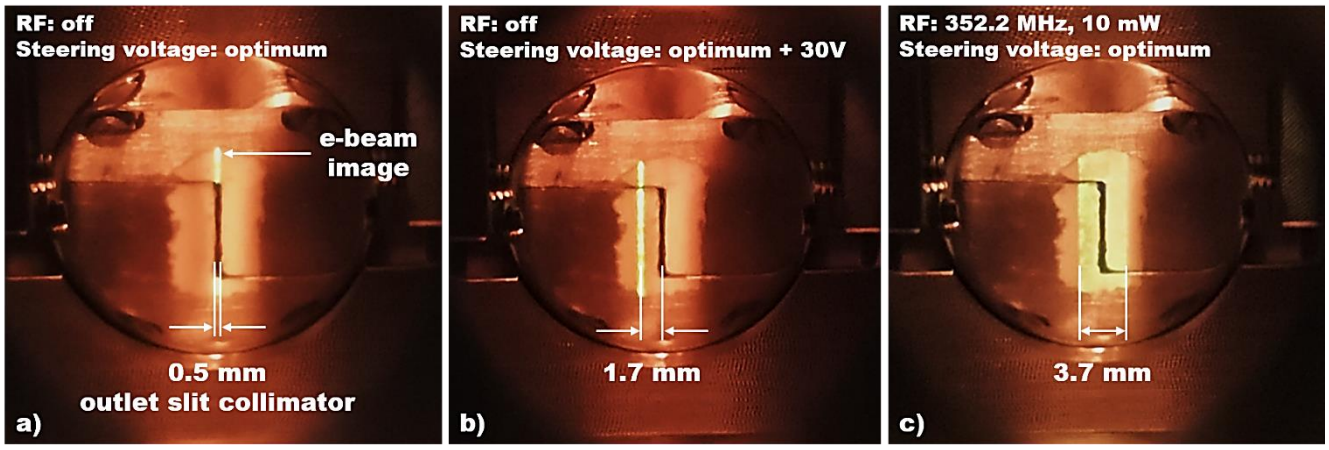


Рисунок 2.5.16 – Испытания ИФС ESS на основе термоэлектронного пучка

Термоэлектроны также могут быть использованы для измерений отклоняющих свойств ВЧ дефлектора, так как при подаче ВЧ поля можно визуально наблюдать расширение электронного пучка. Измерения проводились при постоянном уровне ВЧ мощности 10 дБм (10 мВт). Наблюдаемое значение 2*Zmax составило 3.7 мм. Это означает, что на практике при номинальной мощности используемого ВЧ усилителя 20 Вт Zmax ≈ 72 мм (с учетом сигнального кабеля длиной 30 м и затуханием ~ 4 дБ /100 м). Тогда фазовое разрешение, обусловленное фокусирующими и отклоняющими свойствами дефлектора измерителя, можно оценить сверху как $\Delta\varphi$ = 0.5 мм / 72 мм = 0.4°.

Пучковые испытания ИФС и измерения фазовых характеристик пучка

Испытания измерителя формы сгустков проводились на разных линейных ускорителях ионов. Типичный результат, на примере измерений на линейном ускорителе редких тяжелых ионов FRIB MSU, показан на рисунке 2.5.17.

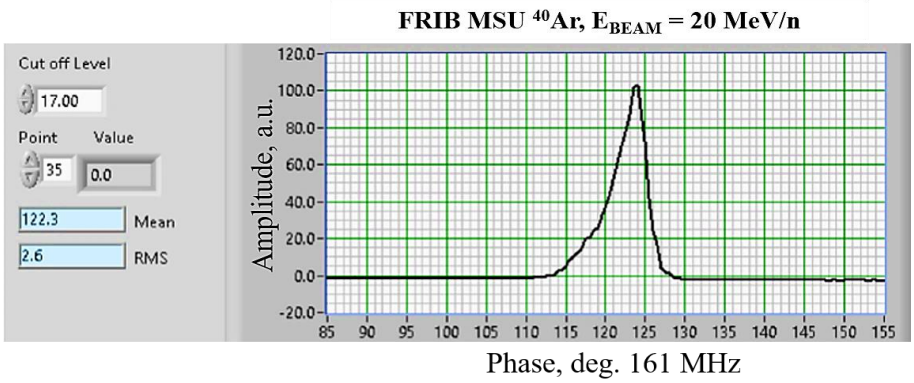


Рисунок 2.5.17 – Результат измерений пучка ионов аргона на ускорителе FRIB

На рисунке 2.5.18 приведены измеренные формы сгустка, интегрированные по всей длительности импульса тока пучка отрицательных ионов водорода LINAC4 CERN, а также показана эволюция формы сгустков в течение импульса тока пучка при разных режимах работы чоппера (слева) и в процессе естественной разгруппировки сгустков на дрейфе длиной ~58 м при движении в канале транспортировки из LINAC4 в кольцо PS-бустера (справа) [30].

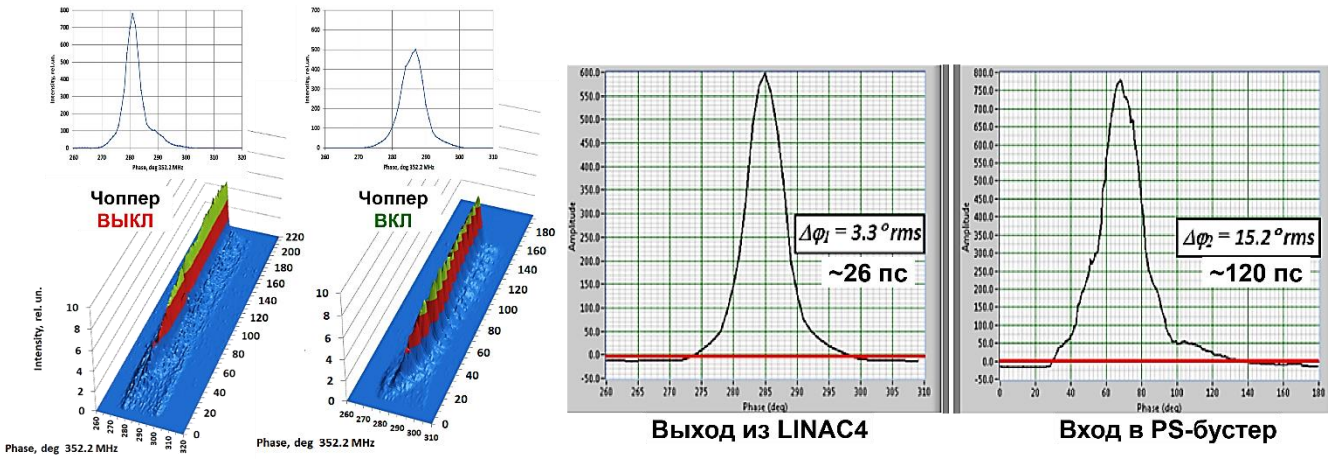


Рисунок 2.5.18 – Эволюция измеренной формы сгустков пучка H^- при включении чоппера и в процессе естественной разгруппировки сгустков в канале транспортировки от выхода ускорителя LINAC4 до входа в кольцо PS-бустера CERN

Возможности ИФС по наблюдению формы сгустков в течение импульса тока исследуемого пучка позволяют контролировать состояние систем стабилизации фаз и амплитуд ВЧ полей в ускоряющих резонаторах. Например, на рисунке 2.5.19 показана измеренная форма сгустка на начальных этапах настройки LINAC4 CERN, когда эффект нагрузки резонатора током пучка приводил к просадке ускоряющего ВЧ поля примерно на 2.5%, что существенно сказывалось на измеряемой фазе сгустков [38].

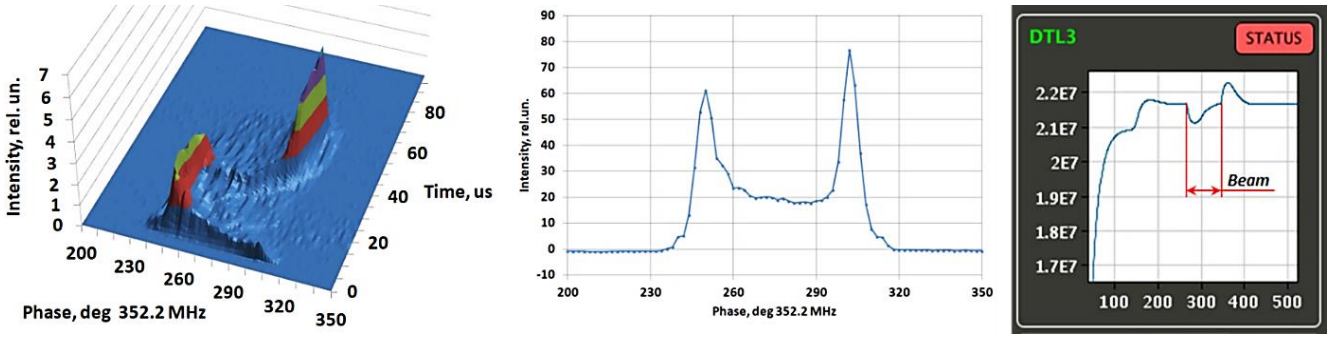


Рисунок 2.5.19 – Результат измерений формы сгустков пучка ионов H^- в LINAC4 под воздействием эффекта нагрузки резонатора током пучка

На рисунке 2.5.20 показан пример эмпирической оптимизации фазы поля в группирователе пучка на UNILAC GSI [27, 34] по продольному профилю сгустка. Вместе с продольными профилями сгустков для разных фаз поля приведена форма сгустка при выключенном группирователе. В таком случае, номинальной фазой поля группирователя можно считать фазу, при которой синхронная фаза сгруппированного сгустка совпадает с положением синхронной фазы несгруппированного сгустка при выключенном группирователе.

Интересным научным результатом, полученным в процессе этих измерений, стало экспериментальное подтверждение возможности расширения фазового измерительного диапазона прибора с помощью поворотной шторки, принцип работы которой был впервые проверен именно в ИФС с тремя сменными ВЧ дефлекторами для линейных ускорителей GSI.

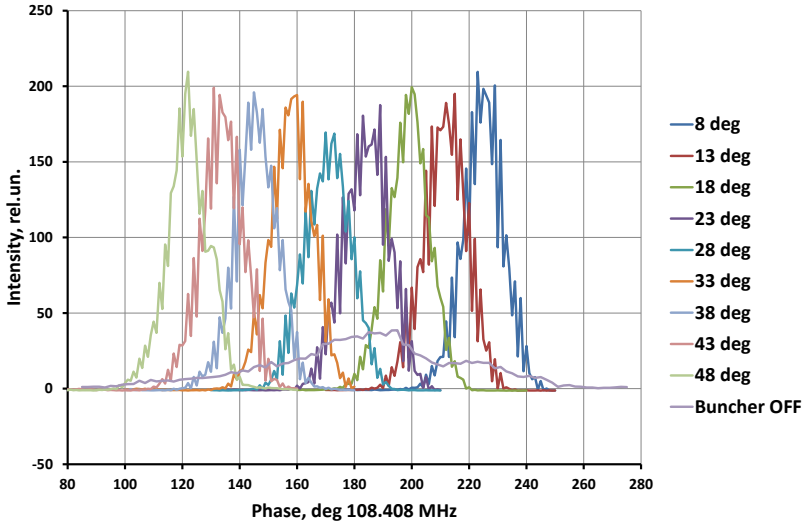


Рисунок 2.5.20 – Измеренные формы сгустков пучка ионов аргона для разных фаз группирователя UNILAC GSI

Хотя фазовая протяженность сгустков была существенно меньше 180° и для проведения диагностических измерений не требовался расширенный диапазон, экспериментально была проверена возможность блокировки шторкой одной из групп электронов, соответствующей одному из двух полупериодов отклоняющего ВЧ поля в дефлекторе, что подтвердило факт расширения фазового диапазона. Результаты измерений [3] демонстрируются на рисунке 2.5.21, где приведены продольные профили сгустков при регулировании фазы отклоняющего поля в диапазоне от 0° до 540° для трех различных положений шторки: а) шторка полностью открыта, б) шторка частично блокирует одну из двух групп электронов, в) шторка полностью блокирует одну из двух групп электронов.

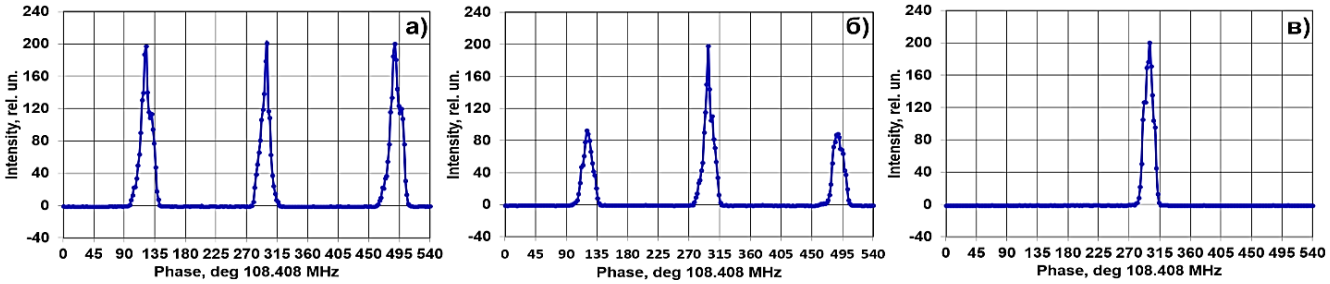


Рисунок 2.5.21 – Результаты экспериментальной проверки расширения фазового диапазона ИФС с помощью поворотной шторки: а) шторка полностью открыта, б) шторка частично повернута, в) шторка полностью закрыта

Итоговые эксплуатационные параметры разработанных ИФС

Исходя из многолетнего опыта разработки (Рисунок 2.5.22) [25] и результатов экспериментальных испытаний, созданные измерители формы сгустков в совокупности обладают следующими рабочими характеристиками:

- тип пучка ионов: любой;
- рабочая энергия пучка ионов: 0.5 ÷ 1000 МэВ/нуклон;
- амплитуда, длительность и частота следования импульсов тока пучка: в пределах допустимого нагрева мишени;
- рабочая частота измерителя: 80 ÷ 352 МГц;
- фазовое разрешение: не хуже 0.5º;
- диапазон измерений по фазам: 360º;
- скорость измерений: 1 фазовая точка за один импульс тока пучка;
- продольный размер для установки в ионопровод: < 155 мм;
- присоединительный стандарт: Conflat DN35, DN63, DN100.

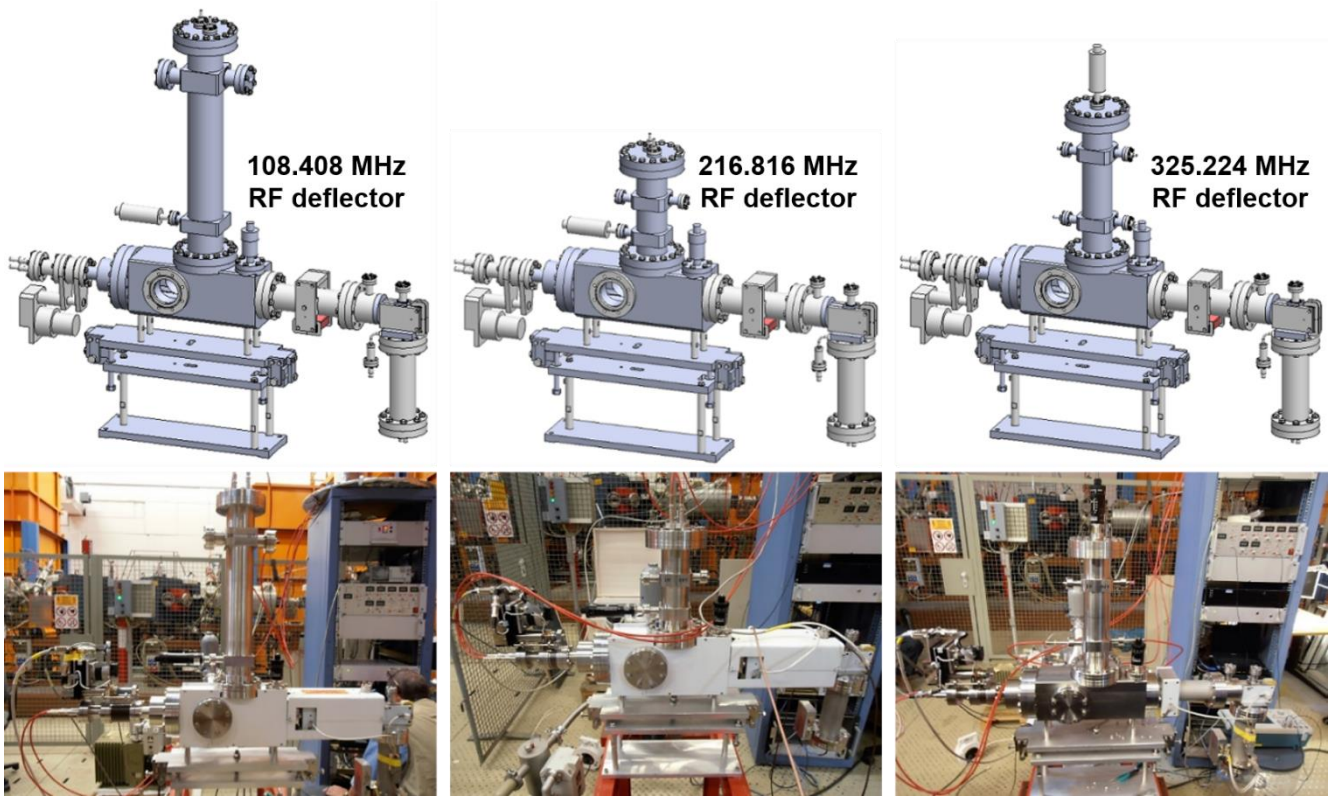


Рисунок 2.5.21 – Измеритель формы сгустков с тремя сменными дефлекторами для GSI

2.6 *Выводы Главы 2*

В Главе 2 описаны результаты работ в рамках нескольких договоров на поставку диагностических устройств и систем для линейных ускорителей ионов, как отечественных, так и зарубежных ускорительных центров, по которым были проведены разработка, изготовление и настройка оригинального оборудования базовой системы диагностики пучков для линейных ускорителей ионов на основе разработанной физико-технической концепции. Из всего многообразия существующего оборудования диагностики параметров пучка было предложено использовать устройства, практическая реализация которых возможна с учетом имеющегося или гарантированно достижимого уровня отечественных технологий:

1. Измерители тока пучка:
   - индукционные датчики тока на основе ферритовых сердечников,
   - охлаждаемые и неохлаждаемые цилиндры Фарадея.
2. Измерители поперечного профиля пучка:
   - двухпроволочные сканеры,
   - многопроволочные профилометры,
   - ионизационные мониторы поперечного сечения,
   - флуоресцентные мониторы.
3. Измерители поперечного эмиттанса пучка:
   - диафрагмированные измерители,
   - щелевые измерители.
4. Измерители положения и фазы:
   - короткозамкнутые полосковые датчики положения пучка
5. Измерители продольной микроструктуры пучка:
   - измеритель формы сгустков (фазовый анализатор).

При этом в процессе исследований для каждого типа устройств были проработаны следующие аспекты:

- предлагаемые варианты реализации устройства,
- конструктивные особенности,
- расчетно-модельные оценки рабочих характеристик,
- параметры электроники,
- итоговые эксплуатационные параметры,

а также проведены лабораторные и/или пучковые испытания с измерениями параметров пучков на действующих линейных ускорителях ионов, в ходе которых были подтверждены не только базовые методики измерений, но и апробированы новые методы, включая верификацию разработанных мультифизичных [136] моделей устройств. В частности, для измерителей формы сгустков, работающих на основе поперечной ВЧ модуляции вторичных низкоэнергетических электронов, было впервые экспериментально показано увеличение измерительного фазового диапазона до полного периода следования сгустков, а также повышение разрешающей способности измерителей до уровня, ограниченного дисперсией времени вылета электронов вторичной эмиссии.

Результатом выполненных работ стали разработанные автором оригинальные конфигурации оборудования диагностики ионных пучков, которые предназначены для широкого круга ускорителей и в совокупности фактически покрывают весь диапазон параметров пучков в существующих и проектируемых линейных ускорителях ионов, как по типу частиц (от протонов и отрицательных ионов водорода до многозарядных тяжелых ионов) и энергиям (от низкоэнергетических каналов транспортировки с энергиями пучка десятки кэВ до высокоэнергетичных участков на выходе современных ускорителей с энергиями ~ 1 ГэВ), так и по интенсивности, позволяя проводить необходимые диагностические измерения и на сильноточных пучках для нейтронных источников, комплексов для наработки медицинских изотопов или протонной флэш-терапии, и на пучках низкой интенсивности, например, для конвенциональной протонной терапии или стендов облучения для исследований радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры.

ГЛАВА 3
РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И НАСТРОЙКА ОРИГИНАЛЬНЫХ СИСТЕМ И МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ИОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СТЕНДОВ ОБЛУЧЕНИЯ

Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН на базе сильноточного линейного ускорителя (ЛУ) протонов и отрицательных ионов водорода включает в себя несколько экспериментальных установок (Рисунок 3.1), в том числе установки, для работы которых пучок протонов выводится на воздух: стенд протонного облучения (СПО) и комплекс протонной терапии (КПТ).

Рисунок 3.1 – Схема ускорительного комплекса ИЯИ РАН в Троицке (г. Москва). H+ – инжектор протонов, H- – инжектор отрицательных ионов водорода; СПО – стенд протонного облучения, КПТ – комплекс протонной терапии, РАДЭКС, ИН-06, СВЗ – нейтронные источники.

Стенд протонного облучения [31, 35] преимущественно предназначен для облучения мишеней пучками протонов, выведенных на воздух, когда облучаемый объект закрепляется на двухкоординатном позиционере, позволяющем обеспечить поле облучения ~300*300 мм^2, однако также существует возможность облучения стационарных мишеней в вакууме как пучками H^-/H^+, так и объединенным пучком частиц с разными зарядовыми состояниями для проведения широкого круга исследований, включая задачи оптимизации ускорения и транспортировки пучков отрицательных ионов водорода.

В связи с этим, стенд может работать в режимах облучения, принципиально отличающихся зарядом частиц, энергией, током и временной структурой ускоренного пучка (Таблица 3.1).

Комплекс протонной терапии, действующий в ИЯИ РАН как исследовательский стенд для отработки методик облучения, также использует разные параметры пучка, работая как в конвенциональном, так и во «флэш» режимах.

Таблица 3.1 – Параметры пучка на СПО и КПТ ИЯИ РАН

Параметр пучка	**СПО**	**КПТ**
Тип частиц на входе в стенд	ионы H^-/ H^+	H^+
Энергия пучка на входе в установку (МэВ)	20÷209	100÷209
Максимальное число частиц в импульсе	$1\cdot10^{12}$	$5\cdot10^{12}$
Минимальное число частиц в импульсе	$1\cdot10^{6}$	$1\cdot10^{9}$
Длительность импульса тока (мкс)	0.3÷150	5÷150
Частота следования импульсов тока (Гц)	1÷50	1÷50

Таким образом, системы диагностики пучков на этих двух установках должны обеспечивать измерения в широком динамическом диапазоне таких ключевых параметров, как: амплитуда и длительность импульсов тока, амплитуда среднего тока, поперечный профиль и положение пучка в облучаемой зоне, для чего был разработан целый ряд оригинальных диагностических устройств:

- индукционные датчики тока (ИДТ) на основе ферритовых сердечников;
- цилиндры Фарадея (ЦФ), совмещенные с контрольными 4-секционными датчиками ореола;
- многопроволочный профилометр (МПП) на основе вольфрамовых проволочек;
- многоламельный профилометр (МЛП) на основе плоских электродов на керамических печатных платах;
- многоанодный газовый счётчик (МГС) на основе ионизационной камеры с дополнительным люминесцентным экраном.

3.1 *Системы диагностики пучков протонов, выведенных на воздух*

Базовая конфигурация стенда протонного облучения для работы с выведенными на воздух пучками протонов представлена на Рисунке 3.1.1. Максимально допустимый средний ток пучка, подаваемого на стенд, ограничен величиной 1 мкА, исходя из требований радиационной чистоты установки при поглощении пучка ловушкой стенда [5], состоящей из графитового ядра, толщиной 200 мм по пучку, закрытого кирпичами из тяжелого бетона (3600 кг/м^3) и блоками из чистого и борированного полиэтилена С0, С3.

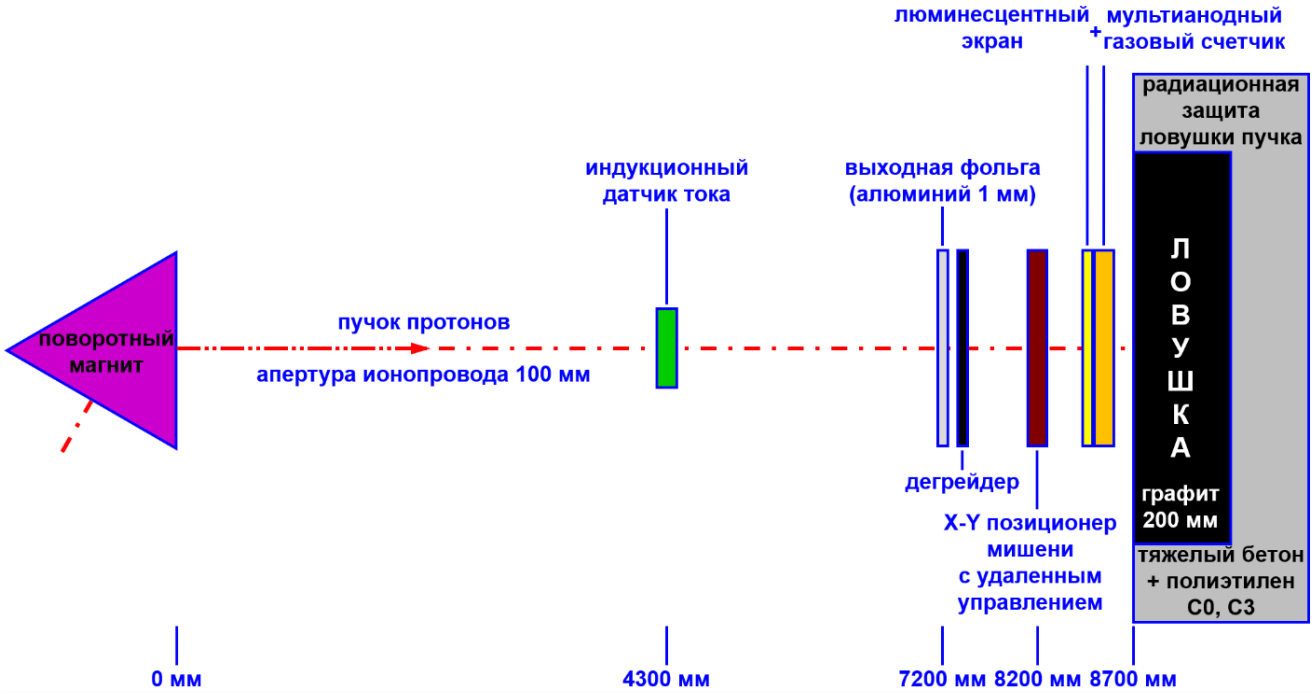


Рисунок 3.1.1 – Конфигурации стенда протонного облучения ИЯИ РАН

Система диагностики пучка на СПО [13, 28] состоит из трех независимых диагностических устройств: индукционного датчика тока, люминесцентного экрана и мультианодного газового счётчика.

Индукционный датчик тока, выполненный на основе ферритового кольца с измерительной обмоткой и калибровочным витком, предназначен для измерений амплитуды и длительности импульса тока пучка, приходящего на стенд.

Люминесцентный экран выполнен в виде тонкого листа, изготовленного на основе смеси люминофора Р43 и полиимидного лака. Светящееся изображение на

экране, образующееся при прохождении пучка (Рисунок 3.1.2), регистрируется видеокамерой. Положение центра экрана устанавливается предварительно относительно оси ионопровода с помощью лазерного нивелира.

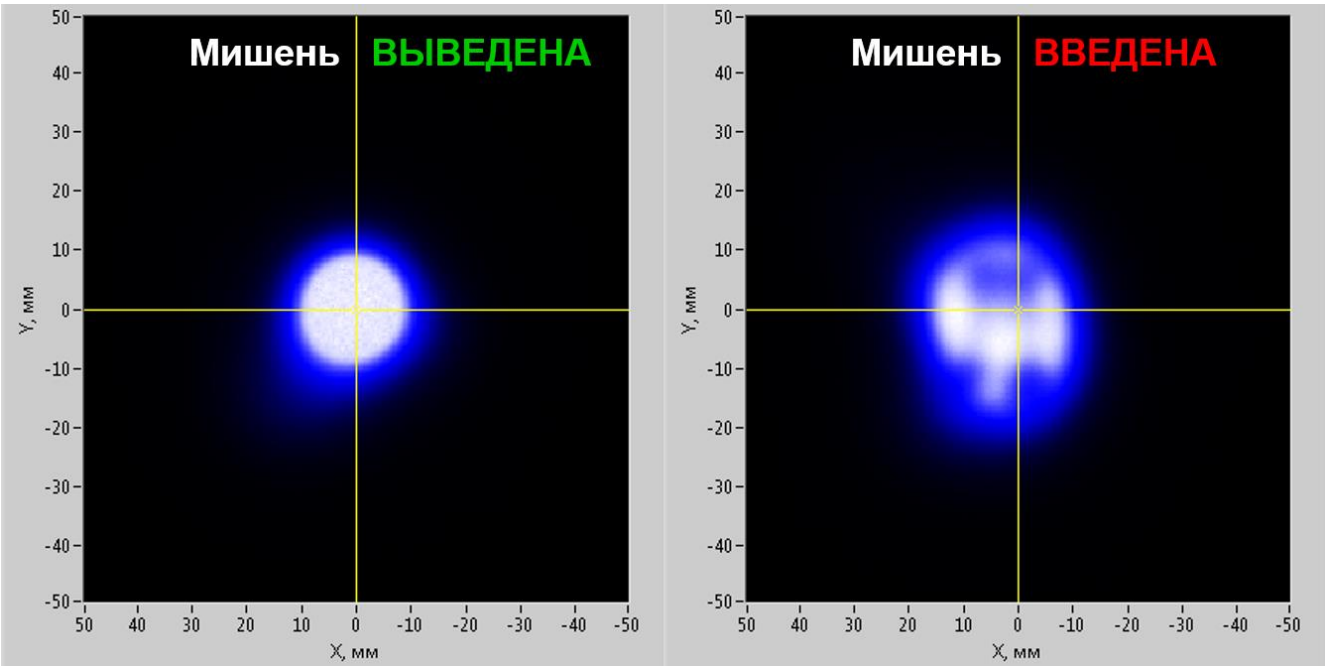


Рисунок 3.1.2 – Примеры наблюдаемых поперечных сечений пучка на люминесцентном экране СПО при выведенной и введенной облучаемой мишени

Благодаря линейной зависимости световыхода люминофора от числа попавших на него частиц, упомянутой в Главе 1, люминесцентный экран можно использовать не только как измеритель профиля пучка, но и суммарного заряда (или числа частиц) в пучке [33] (Рисунок 3.1.3). Основной проблемой при таких измерениях становится не столько деградация люминофора на воздухе, которая постепенно приводит к снижению линейности и абсолютной величины световыхода, сколько быстрая (после 2-3 циклов облучения объектов) и необратимая деградация видеокамеры под воздействием потерь пучка и потоков частиц, идущих от ловушки пучка в обратном направлении, заключающаяся в резком возрастании собственных шумов камеры, а также в нарушении работы контроллера для передачи данных. По итогам первых наладочных сеансов работы СПО для решения этой проблемы была собрана локальная свинцово-бетонная защита видеокамеры.

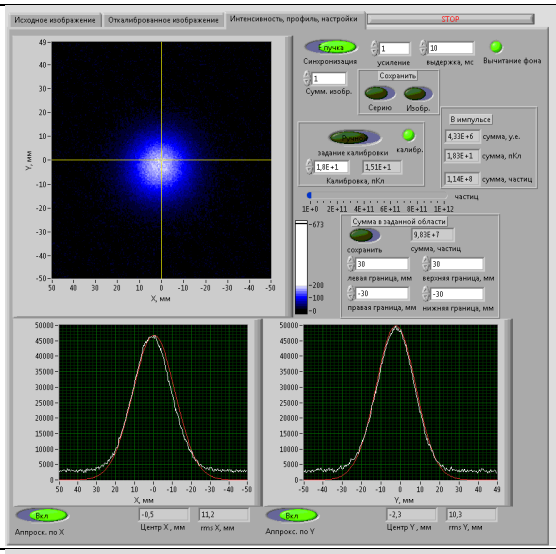
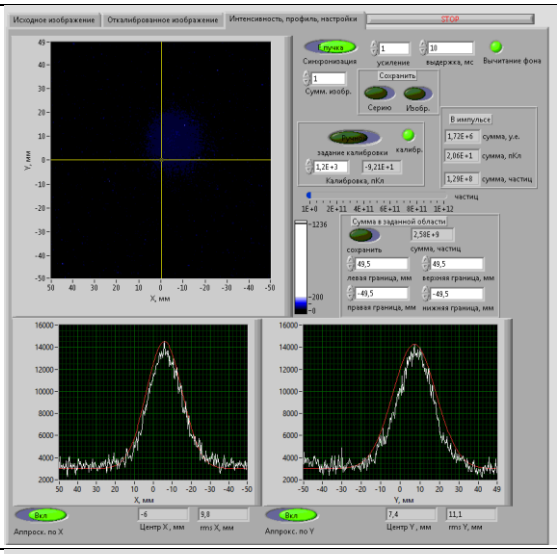
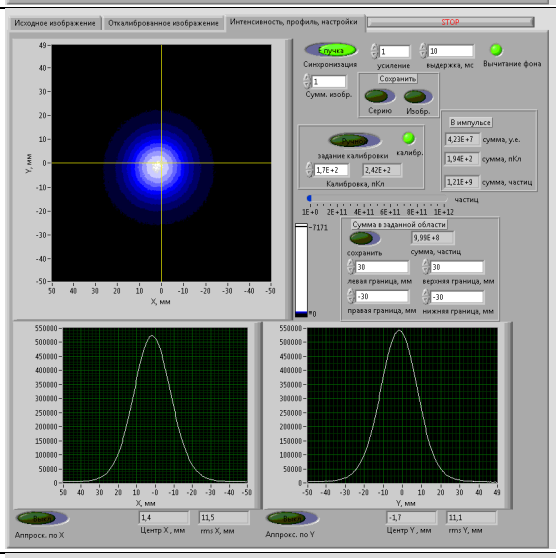
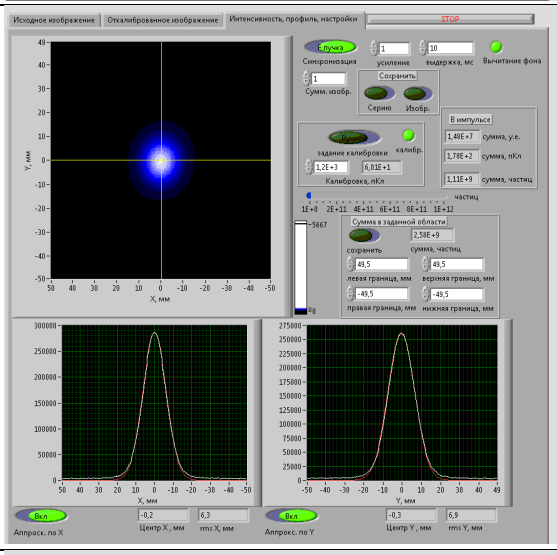
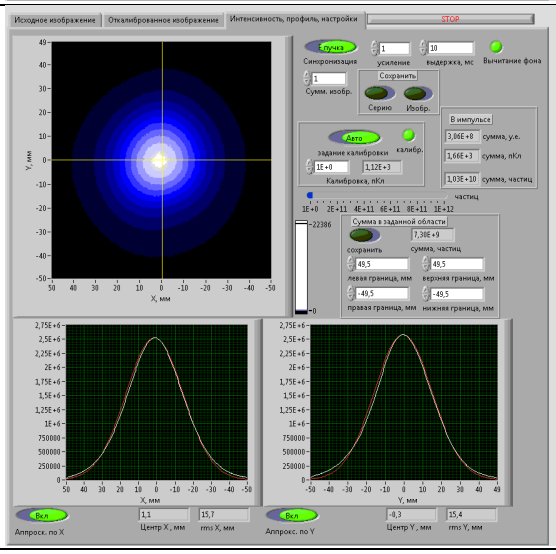
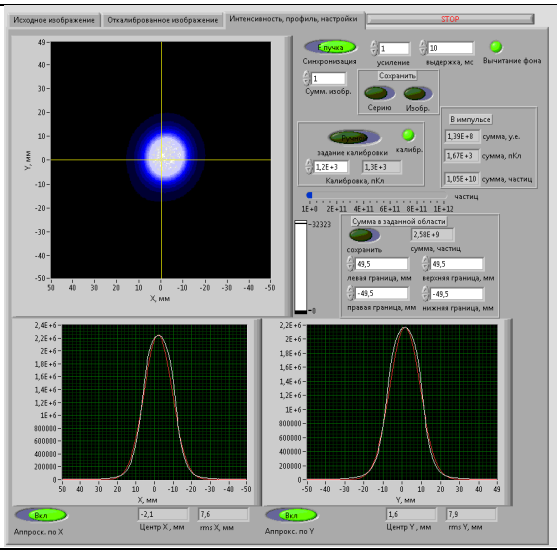
	Начальная энергия пучка: 94.4 МэВ	Начальная энергия пучка: 158.6 МэВ
10^8 протонов в импульсе		
10^9 протонов в импульсе		
10^{10} протонов в импульсе		

Рисунок 3.1.3 – Результаты измерений профилей и количества частиц в импульсах выведенных пучков протонов на люминесцентном экране СПО при разных энергиях

Мультианодный газовый счётчик

Люминесцентный экран закреплен на входной пластине мультианодного газового счётчик (МГС) (Рисунок 3.1.4), который является основным диагностическим прибором СПО для измерения профилей, положения и количества частиц в импульсах выведенных на воздух пучков протонов [7, 32].

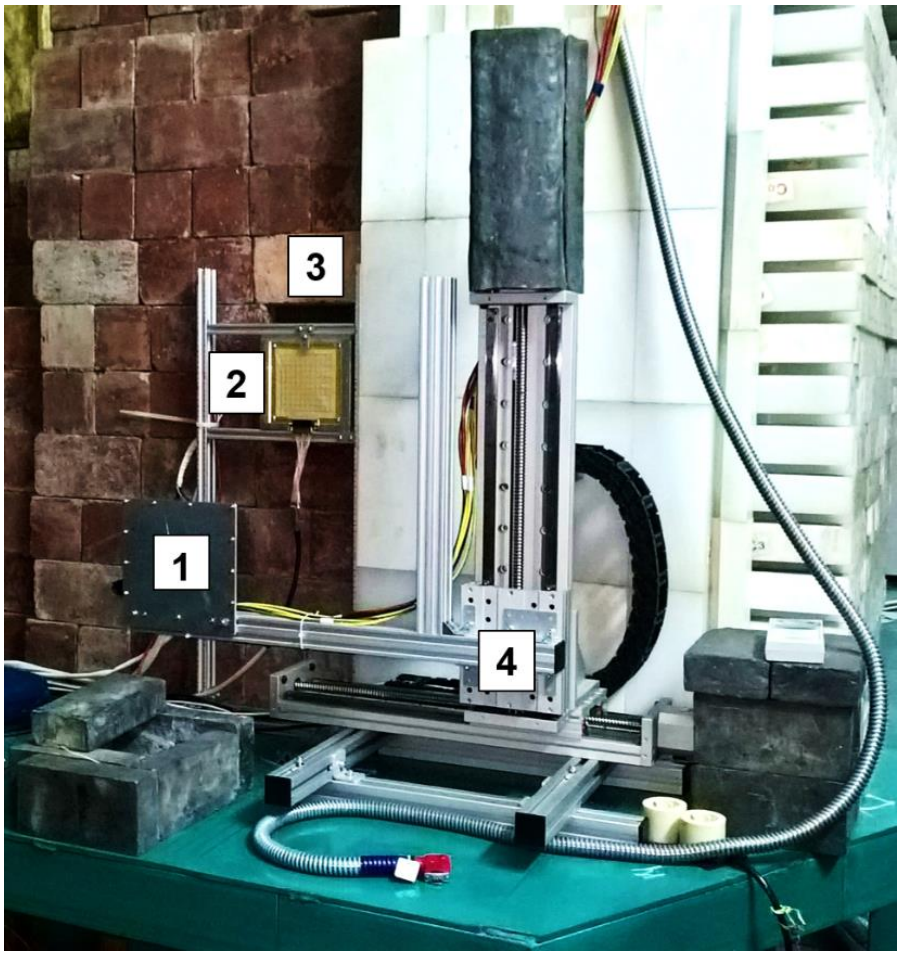


Рисунок 3.1.4 – Фотография области облучения на СПО: 1 – мишень, 2 – МГС с люминесцентным экраном; 3 – ловушка пучка; 4 – 2D-позиционер мишени

Конструктивные особенности МГС

Мультианодный газовый счётчик (Рисунок 3.1.5) состоит из 5 пластин, которые представляют собой печатные платы, изготовленные стандартным промышленным способом из стеклотекстолита FR4 толщиной 0.5 мм и размером 170*170 мм^2. Металлическое покрытие – медная фольга толщиной 18 мкм, покрытая никелем толщиной 5 мкм и иммерсионным золочением толщиной 0.05 мкм.

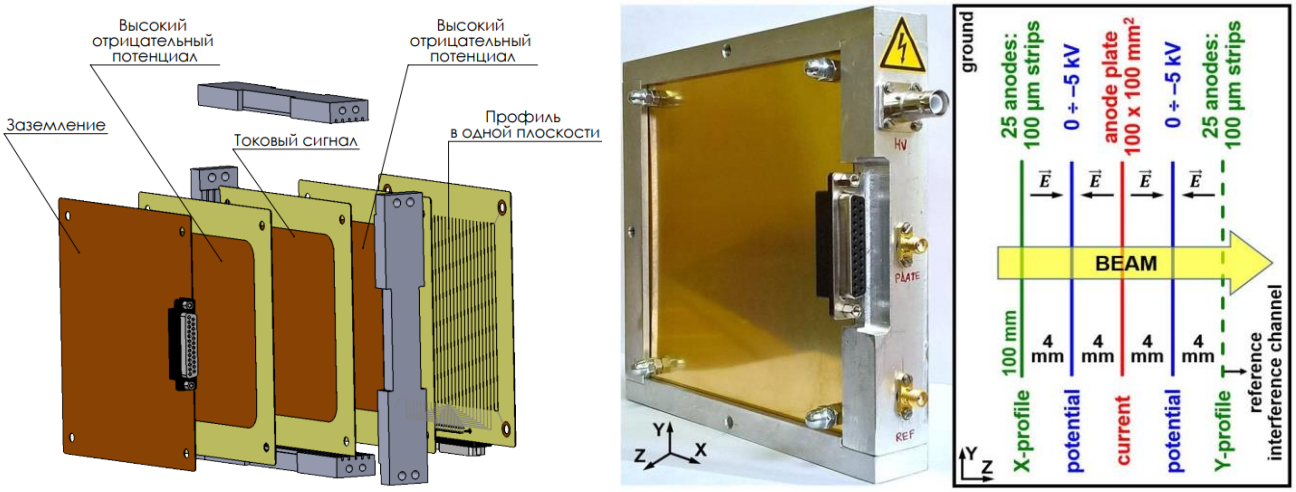


Рисунок 3.1.5 – Трехмерная модель, фотография и конфигурация МГС на СПО

Три центральные пластины образуют двухзазорную ионизационную камеру, в которой электроны первичной ионизации собираются на средней анодной пластине квазиоднородным электростатическим полем. Эта часть детектора позволяет измерять ток пучка в режиме ионизации, когда количество вторичных частиц не зависит от незначительных изменений приложенного напряжения [137]. Боковые области представляют собой пропорциональные камеры для измерения положения пучка и его профиля. Электроны собираются на многоканальной анодной структуре, которая состоит из 25 полосков шириной 100 мкм, длиной 100 мм и шагом 4 мм. Сильное неоднородное поле вокруг полосков приводит к образованию электронных лавин, усиливающих сигнал. Пластины с анодными полосками установлены в ортогональных направлениях для измерения профилей X и Y. Объем счетчика в данной конфигурации не герметизирован, поэтому заполняющим газом при стандартных условиях является атмосферный воздух в туннеле ускорителя.

По своему физическому устройству МГС является абсолютным измерителем, так как его работа основана на известной и достоверно рассчитываемой величине ионизационных потерь протонов в воздухе, позволяющей предсказать количество образующихся электрон-ионных пар первичной ионизации для одного протона. При этом разовая контрольная калибровка выполняется на основе ИДТ, и далее при изменении энергии пучка нет необходимости повторной калибровки устройства.

Параметры электроники МГС

Многоканальная предусилительно-интегрирующая электроника МГС работает с одинаковым коэффициентом усиления для каждого из 51 каналов: 2 x 25 полосков + 1 пластина. Типичное значение единичного коэффициента усиления составляет 50 мВ/пКл и может переключаться с коэффициентом пропорциональности 1/10/100/1000. Регистрируемые сигналы интегрируются в течение импульса тока пучка по каждому каналу одновременно и затем передаются мультиплексором со временем обработки ~24 мкс на канал.

Пучковые испытания МГС и измерения параметров пучка

Пример рабочего окна с данными МГС и ИДТ приведен на рисунке 3.1.6. Снизу вверх показаны: «сырые» сигналы МГС и ИДТ, обработанные X,Y-профили пучка по данным МГС с фитированием по Гауссу (красная кривая, центр и RMS), а также отображено измеренное количество частиц в импульсе для энергии пучка 157 МэВ.

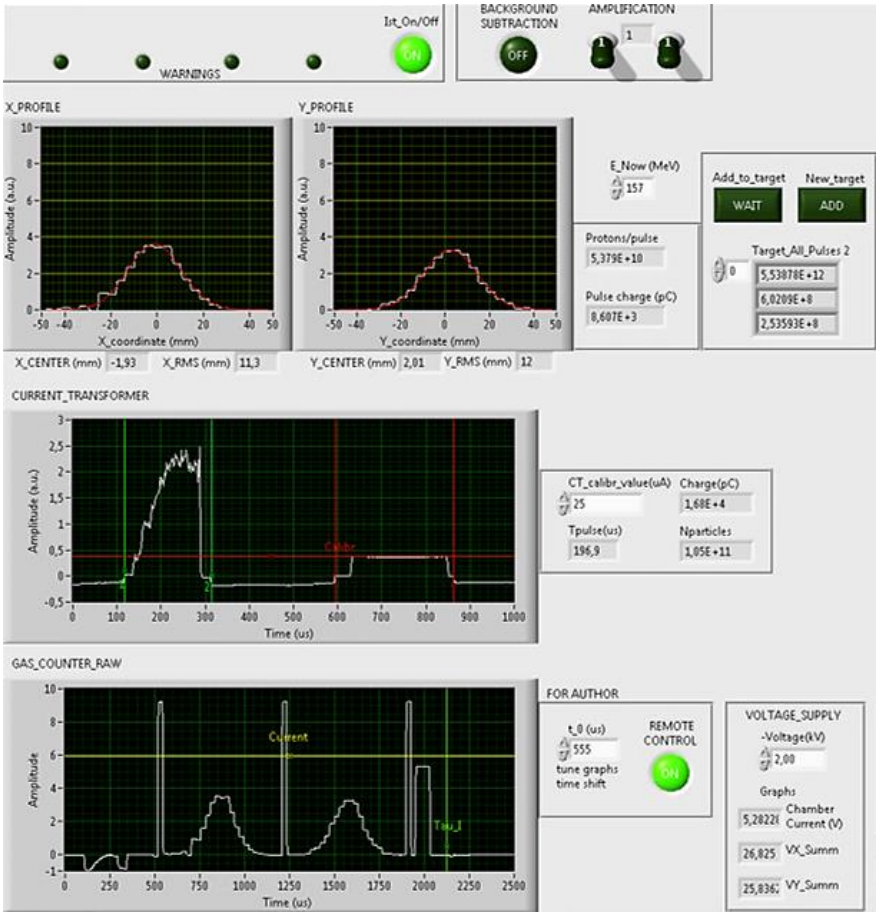


Рисунок 3.1.6 – Рабочее окно МГС и ИДТ с диагностическими данными пучка на СПО

Примеры работы МГС в качестве профилометра показаны на рисунке 3.1.7.

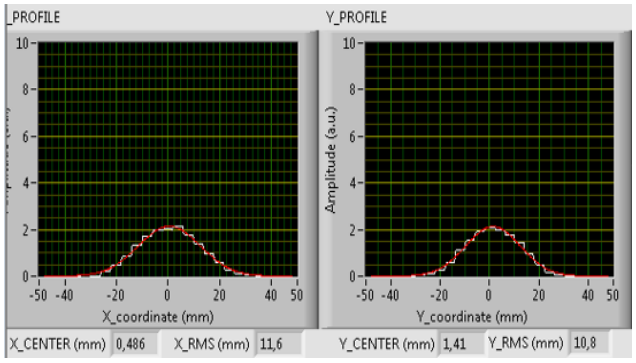
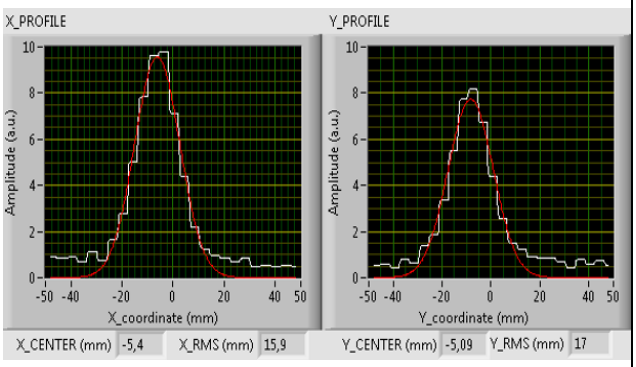
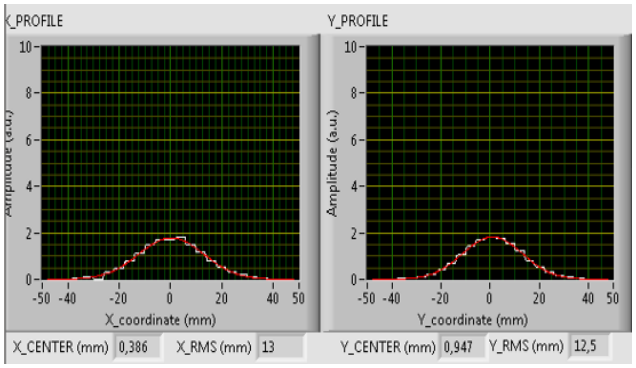
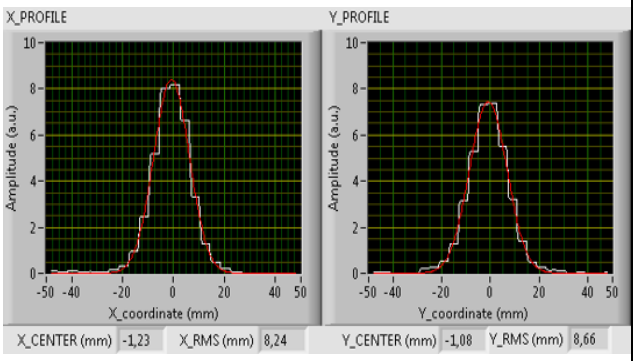
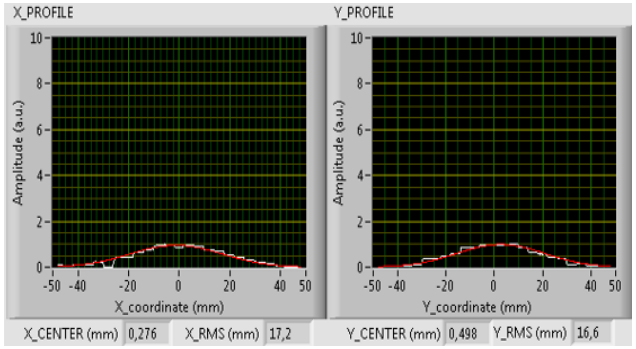
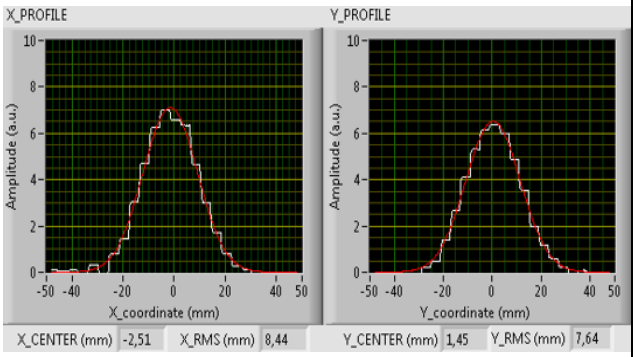
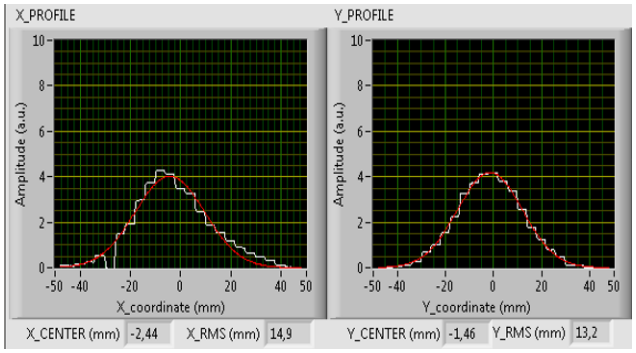
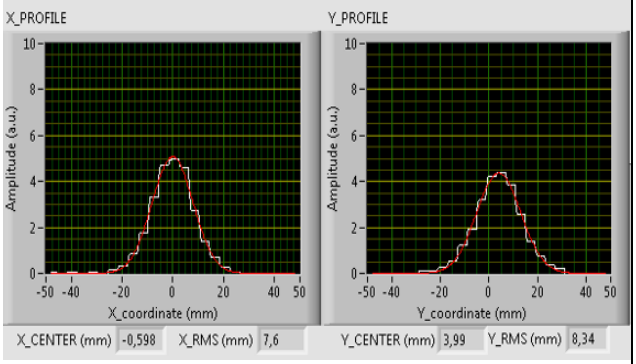
	Начальная энергия пучка: 94.4 МэВ	Начальная энергия пучка: 158.6 МэВ
10^8 протонов в импульсе		
10^9 протонов в импульсе		
10^{10} протонов в импульсе		
10^{11} протонов в импульсе		

Рисунок 3.1.7 – Результаты измерений профилей выведенных пучков протонов на мультианодном газовом счётчике СПО при разных энергиях и интенсивностях

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик МГС

Хорошо известно, что для ионизационной камеры пороговое напряжение режима ионизации не является постоянной величиной и зависит от тока первичного пучка и расстояния между электродами [138]. Для проектирования камеры необходимо знать диапазон используемых токов пучка, а также максимальное рабочее напряжение источника питания, которое необходимо дополнительно стабилизировать с помощью параллельного подключения буферной ёмкости так, чтобы просадка напряжения не превышала 5-10 % во всём диапазоне анализируемых токов первичного ионного пучка.

Рекомбинация зарядов

Классическое решение для определения эффективности сбора частиц f в ионизационной камере с рекомбинацией зарядов было получено в [138]:

$$f = \frac{1}{u}\, ln(\, 1 + u\,). \tag{3.1.1}$$

Безразмерная переменная u определяется, как

$$u = \frac{a n_0 d^2}{(k_+ + \, k_-)\, V}, \tag{3.1.2}$$

где a – коэффициент объемной рекомбинации, n_0 – начальная концентрация положительных или отрицательных частиц в объеме камеры, d – расстояние между электродами, $k_\pm$ – подвижность положительных или отрицательных частиц, V – приложенное напряжение.

Формула 3.1.1 верна для процесса мгновенной ионизации в объеме камеры, т.е. только при длительности импульса входящего пучка, значительно меньшей, чем время сбора частиц. Однако если использовать МГС для относительно длинных импульсов ~50÷100 мкс и более, время сбора частиц становится меньше длительности импульса, и формула 3.1.1 больше не работает, т.к. параметр n_0 в этом случае теряет свой смысл. Необходимо интегрировать уравнение рекомбинации с внешним источником ионизации q [Кл/(м^3·с)], для которого начальное значение n_0 не влияет на конечный стационарный ответ. Новый аргумент функции f должен содержать q в качестве переменной.

Безразмерный параметр ξ для длинных импульсов был получен в [139]:

$$\xi = \frac{md^2\sqrt{q}}{V}, \tag{3.1.3}$$

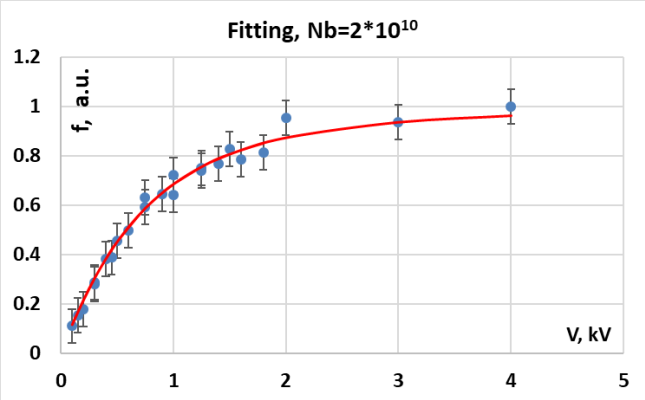
где m – константа, зависящая от свойств газа.

Теперь эффективность сбора может быть представлена следующим образом: $f = \Phi(\xi)$, где вид функции Φ определяется физической моделью рекомбинации. В простейшем случае её можно записать в виде формулы:

$$f = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{2}{3}\,\xi^2}}, \tag{3.1.4}$$

но также возможны и другие параметризации для учета свободных электронов [140].

После нахождения необходимого значения m для формулы 3.1.4 в соответствии с экспериментальными данными (Рисунок 3.1.8, слева), приведенная формула может предсказать форму сигнала и пороговое напряжение насыщения. Это можно сделать для различных значений количества частиц в импульсе тока пучка N_b, пропорциональных q. Фитирование можно выполнить, используя кривые ионизации для различных интенсивностей, в данном случае были выбраны значения, измеренные для большого импульсного тока пучка, которые можно было однозначно сопоставить с данными индукционного датчика тока.



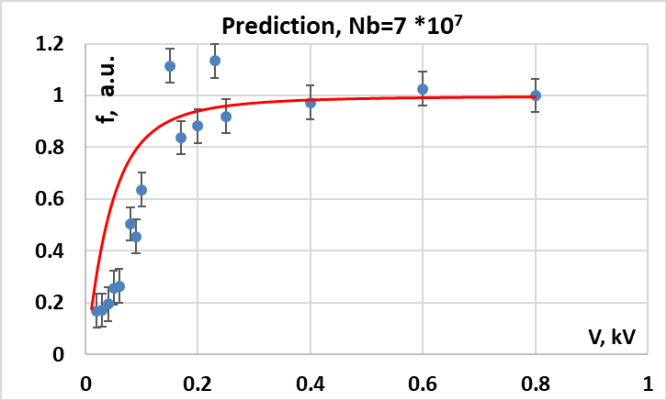


Рисунок 3.1.8 – Экспериментальный (синие точки) сигнал МГС и расчетное предсказание (красная линия) напряжение насыщения: параметр m находится по фитированию на левом рисунке и используется для расчета на правом рисунке

Для нахождения экспериментального значения напряжения насыщения, можно интерполировать данные и найти значение напряжения, при котором уровень плато снижается, например, на 10%, при этом для того, чтобы найти теоретическое значение V_{sat} нужно решить уравнение 3.1.4 для $f(\xi_{sat}) = 0.9$. Теоретическая зависимость напряжения насыщения получается из того факта, что ξ_{sat} является безразмерной константой, определяемой формулой 3.1.3, и поэтому при фиксированном расстоянии между электродами:

$$V_{sat} = const * \sqrt{q}. \quad (3.1.5)$$

В логарифмических координатах теоретическая зависимость $V_{sat}(N_b)$ – линейная зависимость с наклоном 0.5. Экспериментальные данные при этом описываются линейным законом с наклоном 0.38 ± 0.01 (Рисунок 3.1.9).

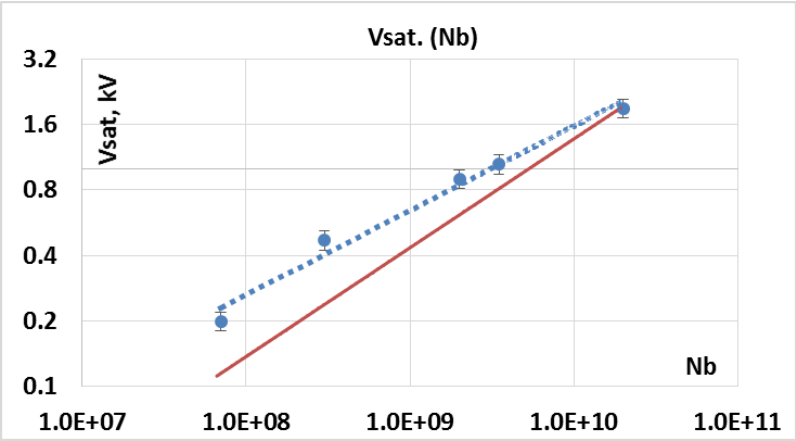


Рисунок 3.1.9 – Экспериментальные значения (синие точки) и теоретическое предсказание (красная линия) напряжения насыщения на уровне 0.9 от напряжения ионизационного режима для разных значений числа частиц в пучке в двойном логарифмическом масштабе

Другим важным следствием формулы 3.1.3 и того, что $\xi_{sat} = const$ является зависимость $V_{sat}(d)$, которая позволяет найти нужный размер газового зазора:

$$V_{sat} = const * L^2. \quad (3.1.6)$$

Ионизационный режим работы

Для вычисления количества образованных электрон-ионных пар в объеме камеры, предположим, что заполняющий газ содержит 80% молекул N_2 и 20% молекул O_2.

Количество электронов первичной ионизации N_{prim} зависит от ионизационных потерь *dE/dx* протона в воздухе, ширины газового зазора *d* и эффективной средней энергии для образования одной электрон-ионной пары W_i: формула 3.1.7, рисунок 3.1.10. Для расчётов использовалось усредненное значение W_i= 32.5 эВ для воздуха [137, 141].

$$N_{prim} = (dE/dx) * d/W_i. \quad (3.1.7)$$

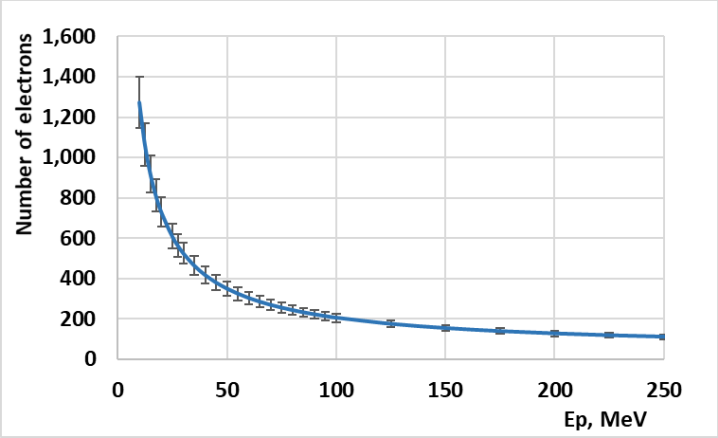


Рисунок 3.1.10 – Количество первичных электронов ионизации для различных энергий протонов в воздушном зазоре шириной 8 мм

Используя данные, приведенные на рисунке 3.1.10, можно предсказать индуцированный сигнал на центральном аноде, т.е. уровень плато режима ионизации (Рисунок 3.1.11) для различных энергий падающего пучка

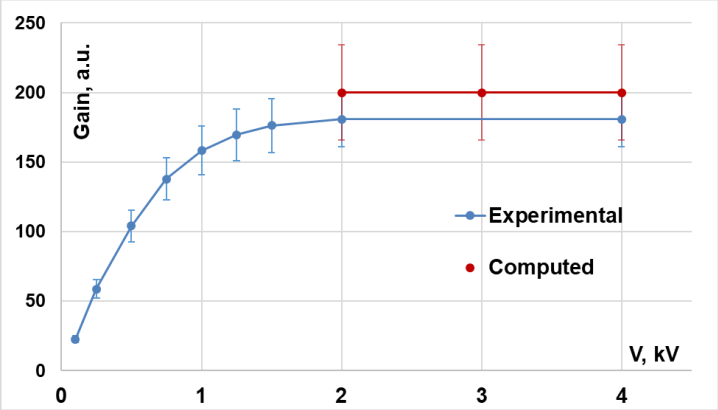


Рисунок 3.1.11 – Экспериментальный (синяя линия) и расчетный (красная линия) суммарный коэффициент ионизационного усиления МГС для энергии протонов 94 МэВ при интенсивности 10^{10} протонов в импульсе 100 мкс

Электроны первичной ионизации дрейфуют в электрическом поле, подвергаясь различным типам столкновений с молекулами N_2 и O_2 [142, 143] (Рисунок 3.1.12) и участвуют в реакциях двух- и трёхчастичного объединения, формулы 3.1.8 и 3.1.9 соответственно. Особенности дрейфа электронов в однородном поле были получены с помощью статистических расчетов Bolsig+ [142] (Рисунок 3.1.13).

$$e + O_2 \rightarrow O^- + O. \tag{3.1.8}$$

$$e + O_2 + \{O_2/N_2\} \rightarrow O_2^- + \{O_2/N_2\}. \tag{3.1.9}$$

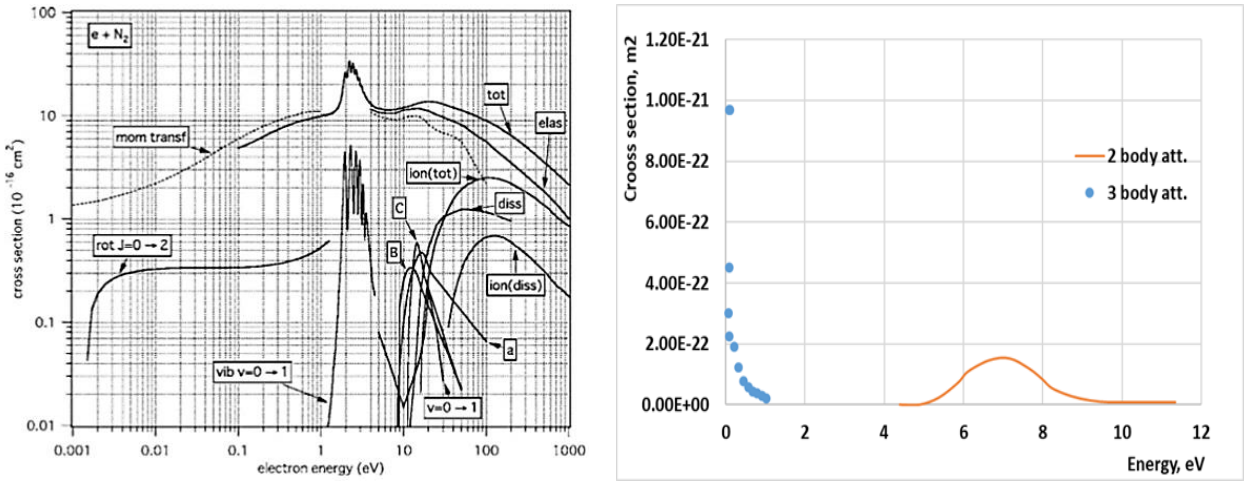


Рисунок 3.1.12 – Слева: сечения взаимодействий электрона с молекулой N_2 в зависимости от энергии падающего электрона. Справа – сечения реакций двух- и трёхчастичного объединения электронов с молекулами O_2

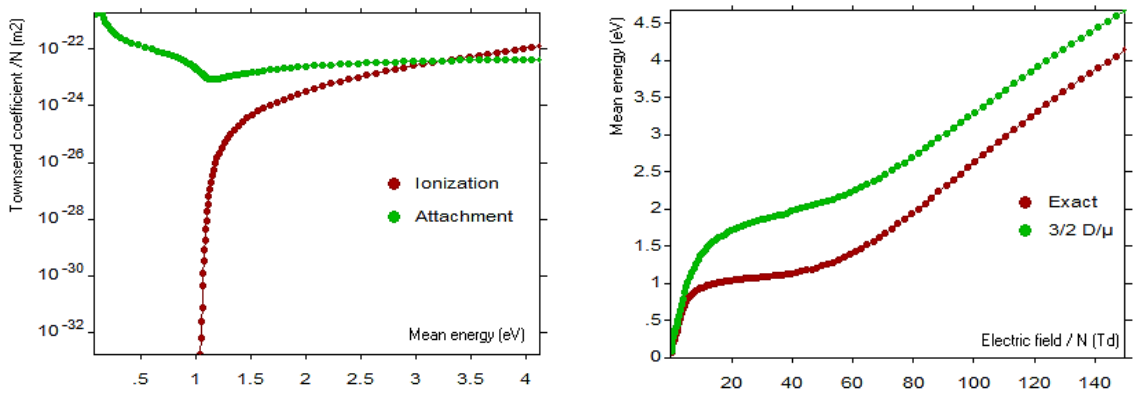


Рисунок 3.1.13 – Слева: коэффициенты Таунсенда для $\alpha(E)$ ионизации и $\eta(E)$ объединения с молекулами в воздухе, зависящие от средней энергии электронов. Справа: средняя энергия электронов от приведенного электрического поля. 3/2 D/μ – зависимость для распределения энергии электронов по Максвеллу

Следует отметить, что измеряемый сигнал ионизационной камеры обусловлен не физическим сбором частиц, а индуцированными электрическими полями, возникающими из-за движущихся зарядов [144, 145]. Таким образом, как электроны, так и ионы вносят свой вклад в измеряемый сигнал.

В газе с электроотрицательными молекулами кислорода часть электронов преобразуется в отрицательные ионы в процессе дрейфа к электроду. После реакции вместо электрона ток будет вызван движением отрицательного иона. Ионы будут собираться за большее время, при этом регистрируемый суммарный сигнал на электроде не уменьшится, однако изменится его временной профиль. Таким образом, в случае объединения электронов с молекулами газа можно получить временную структуру регистрируемого сигнала в виде суммы трёх компонент: электронов, положительных и отрицательных ионов $i^{e,+,-}(t)$ – формулы 3.1.10 – 3.1.12. Электроны первичной ионизации образуют отрицательные ионы в результате реакций присоединения, при этом суммарный индуцированный заряд в режиме ионизации не зависит от количества присоединенных электронов [146].

$$i^{e}(t) = \frac{Q_0}{t_{de}}\left(1 - \frac{t}{t_{de}}\right) exp\left(-\frac{t}{T_a}\right), \tag{3.1.10}$$

$$i^{+}(t) = \frac{Q_0}{t_{d+}}\left(1 - \frac{t}{t_{d+}}\right), \tag{3.1.11}$$

$$i^{-}(t) = \frac{Q_0}{t_{d-}}\left[1 - \frac{t}{t_{d-}} - \frac{T_a}{t_{de}}\left\{1 - exp\left(-\frac{t_{de}}{T_a}\left(1 - \frac{t}{t_{d-}}\right)\right)\right\}\right], \tag{3.1.12}$$

где Q_0 – суммарный заряд электронов первичной ионизации, $t_{de,+,-}$ – время дрейфа электронов или ионов соответствующего знака, T_a – время объединения [145].

Временная структура индуцированного тока импульсным пучком может быть получена с помощью операции свертки временной структуры импульса с зависимостями 3.1.10 – 3.1.12 (Рисунок 3.1.14). Ненулевой хвост на заднем фронте экспериментально измеренного сигнала МГС для длинных импульсов пучка вызван последствиями физической деградации счетчика и будет рассмотрен далее.

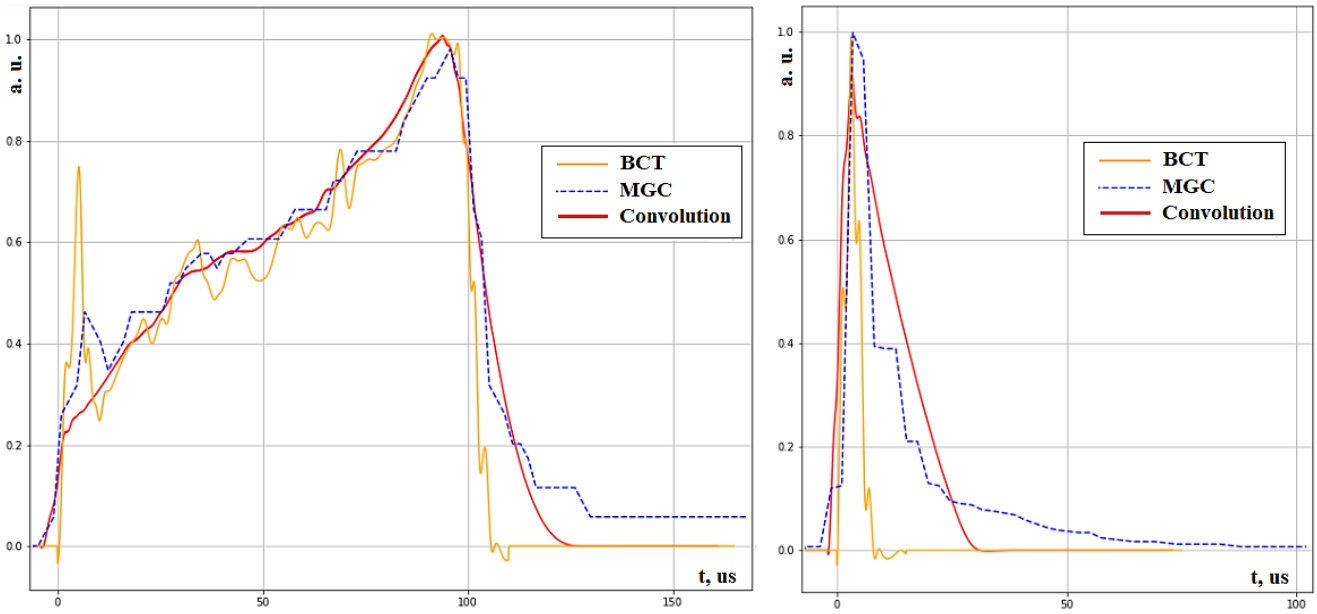


Рисунок 3.1.14 – Сравнение нормализованных сигналов ИДТ, МГС в ионизационном режиме и расчетного сигнала, полученного методом свертки. Слева – данные для импульса пучка длительностью 100 мкс, справа – для импульса пучка длительностью 1 мкс. Напряжение на электродах МГС – 2 кВ, газ – атмосферный воздух при нормальных условиях

Молекула H_2O также является электроотрицательной, поэтому электроны первичной ионизации, взаимодействуя с ней, могут образовывать ионы O^-, H^- и OH^-. Общее сечение образования ионов [146] имеет тот же порядок величины, что и для молекул O_2, но доля молекул H_2O в воздухе примерно на порядок меньше, чем молекул O_2, поэтому присутствие воды в расчетах не учитывается.

Пропорциональный режим работы

Боковые пластины МГС с анодными полосками работают в режиме пропорциональной камеры, для которой так же можно построить модель прогнозирования характеристик по коэффициенту усиления и рабочему напряжению. В частности, может быть рассчитано распределение электрического поля вокруг полоска – на рисунке 3.1.15 показан пример моделирования поля вокруг одного из полосков МГС с зафиксированной под микроскопом геометрией.

Дополнительный интерес представляет напряженность электрического поля E(s) вдоль линии, перпендикулярной плоскости полоска. Очевидно, что результат такого моделирования сильно зависит от выбранной геометрии, поэтому информация о реальной форме полоска после травления в процессе изготовления печатной платы является критически значимой.

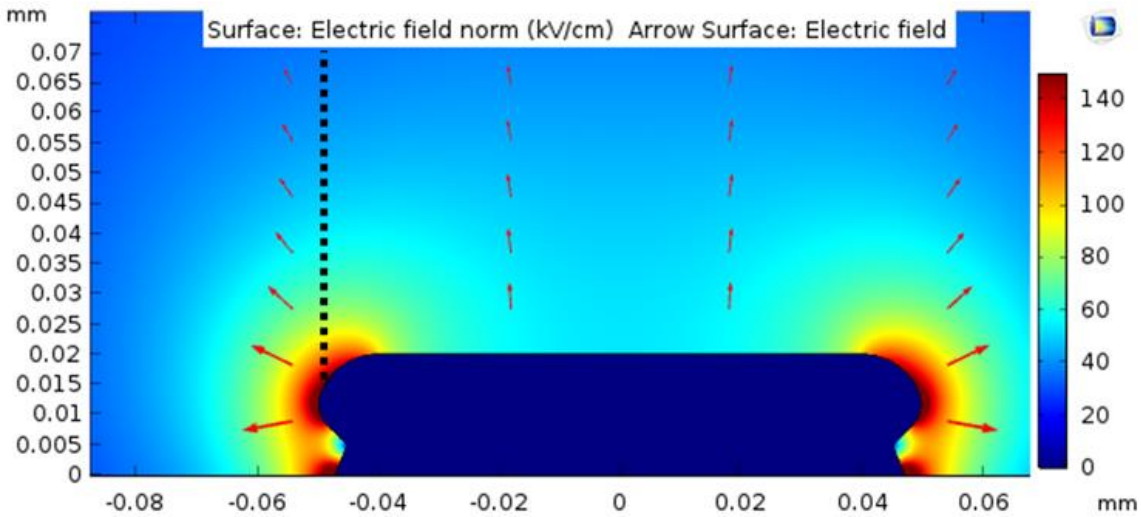


Рисунок 3.1.15 – Распределение электрического поля вблизи полоска МГС при напряжении 4 кВ. Черная пунктирная линия предназначена для получения E(s)

В пропорциональном режиме электроны, в отличие от ионов, могут получить достаточно энергии для ионизации и образования дополнительной электрон-ионной пары, следовательно, необходимо рассматривать различные составляющие суммарного индуцированного сигнала по отдельности. После интегрирования (3.1.13), где n – концентрация электронов, можно получить коэффициент умножения количества электронов $\bar{n}(s') = n(s')/n_0$ после пройденного расстояния s' (3.1.14). Аналогичное дифференциальное уравнение 3.1.15 может быть решено для коэффициента усиления положительных ионов $\bar{m}(s)$ (3.1.16). Первое слагаемое справа – это положительный прирост ионов за счет лавинного умножения электронов, второе слагаемое представляет собой первичный прирост ионизации. Завершающий шаг – суммирование коэффициентов умножения от всех слоев над собирающим электродом, для того чтобы получить $\bar{m}_\Sigma$ (3.1.17).

$$dn = (\alpha - \eta)\, n\, ds. \tag{3.1.13}$$

$$\bar{n}(s') = exp\left(\int_0^{s'} \alpha(E(s'')) - \eta(E(s''))\ ds''\right). \tag{3.1.14}$$

$$dm = \alpha\, n\, ds. \tag{3.1.15}$$

$$\bar{m}(s) = \int_0^{s} \alpha(E(s'))\, \bar{n}(s')\, ds' + 1. \tag{3.1.16}$$

$$\bar{m}_{\Sigma} = \frac{1}{L}\int_0^{L} \bar{m}(s)\, ds. \tag{3.1.17}$$

Благодаря сохранению заряда суммарный коэффициент усиления $\bar{m}_{\Sigma}$ одинаков для положительных ионов, и для суммы электронов и отрицательных ионов. Суммарный индуцированный заряд на собирающем электроде в $\bar{m}_{\Sigma}$ раз больше, чем в режиме ионизации. Таким образом, можно получить характеристики пропорциональной камеры по коэффициенту усиления и напряжению, последовательно применяя формулы 3.1.14, 3.1.16, 3.1.17. Входными данными являются зависимость *E(s)* и коэффициенты Таунсенда *α(E)* и *η(E)*. Результаты такого расчета представлены на рисунке 3.1.16.

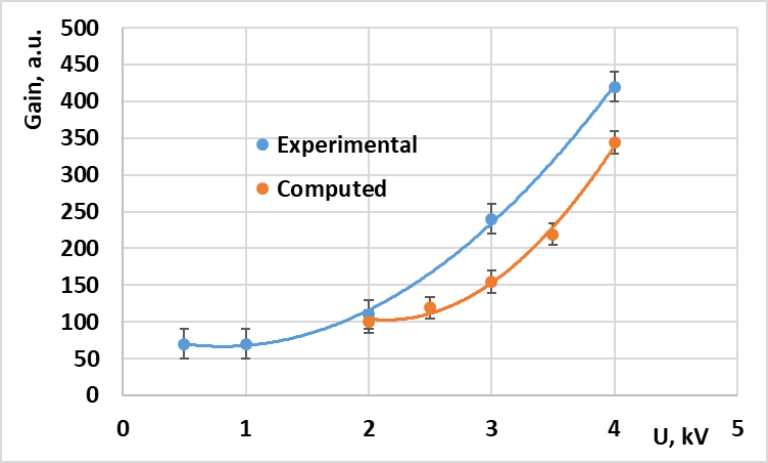


Рисунок 3.1.16 – Экспериментальная (синяя) и расчетная (оранжевая) зависимости коэффициента газового усиления МГС в пропорциональном режиме для выведенного пучка протонов с энергией 94 МэВ

Особенности эксплуатации МГС и эффекты деградации

Экспериментальный рабочий диапазон МГС в описанной конфигурации составляет $10^7 \div 10^{11}$ протонов в импульсе длительностью ~130 мкс. Менее интенсивные пучки производят сигнал ниже порога чувствительности электроники МГС, а более интенсивные пучки приводят к окислению и полному выгоранию полосков в пропорциональных камерах. На рисунке 3.1.17 показана фотография полосков с цветами побежалости, свидетельствующими о значительном перегреве конструкции в процессе эксплуатации.

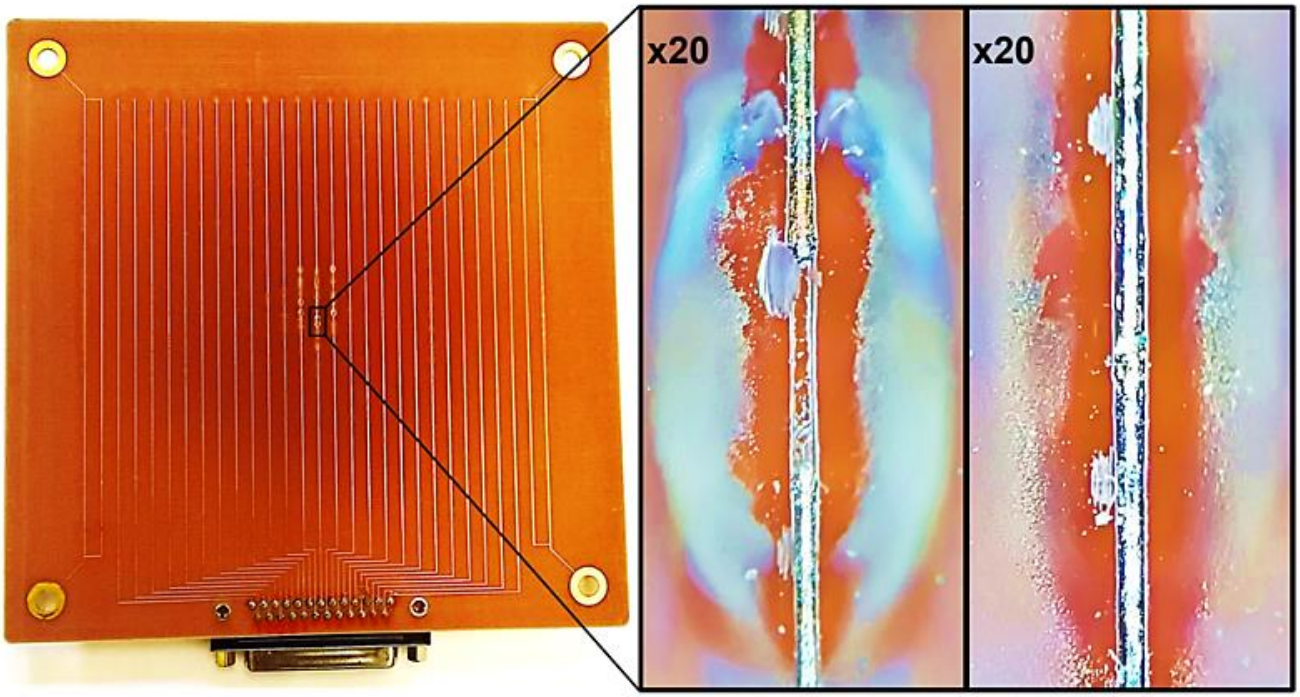


Рисунок 3.1.17 – Окисление и разрушение сигнальных полосковых анодов пропорциональных камер МГС после тестов с пучком 10^{12} протонов в импульсе

Диэлектрическая оксидная пленка уменьшает напряженность поля, воздействующего на частицы в лавинной области вблизи полосков, тем самым уменьшая сигнал [147]. Решение проблемы заключается в использовании газового наполнения, не содержащего O_2, или измерении профиля пучка в ионизационном режиме, т.к. тонкие полосковые аноды в пропорциональном режиме подвергаются физическому разрушению из-за высокой ионизации вблизи их поверхности.

Более того, даже из-за небольших изменений формы полосков и их окисления коэффициент пропорционального усиления после облучения не остается прежним. Количественно этот эффект представлен на рисунке 3.1.18, на котором при одном и том же напряжении измеренные профили пучка почти идентичны для интенсивности $4.4*10^9$ протонов в импульсе и пучка с интенсивностью в 2.5 раза больше после прохождения через счетчик ~$2.5\cdot10^{15}$ протонов в течение нескольких сеансов работы СПО.

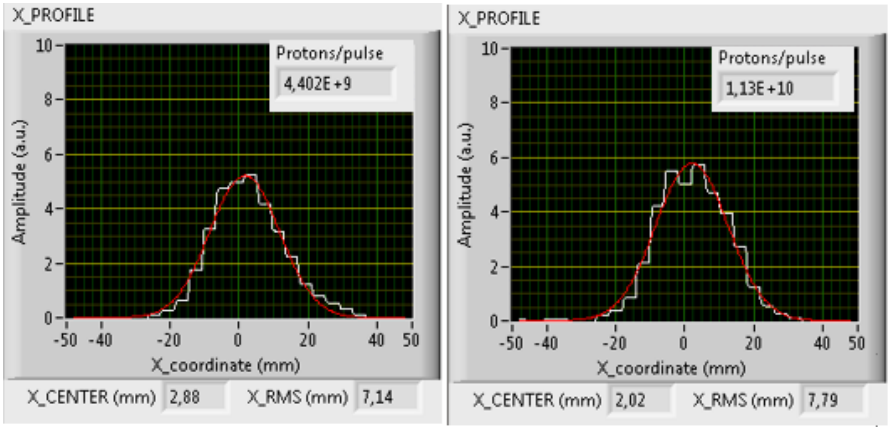


Рисунок 3.1.18 – X профили для симметричного пучка. Слева – для $4.4*10^9$, справа – для $1.13*10^{10}$ протонов в импульсе после облучения $2.5*10^{15}$ протонами

Очевидно, что в основном повреждаются центральные полосковые аноды пропорциональных камер в местах прохождения пучка, а большие квадратные аноды ионизационной камер деградируют гораздо меньше. Тем не менее, этот эффект приводит к необходимости регулярной повторной калибровки МГС в данной конфигурации. Катодные диэлектрические отложения, явный пример которых показан на рисунке 3.1.19, блокируют положительные ионы, медленно диффундирующие через изолирующий слой. При длинных (> 50 мкс) импульсах тока пучка накапливающееся количество положительных ионов вблизи катода оказывается достаточным, чтобы вызвать автоэмиссию электронов – так называемый эффект Мальтера [148]. Эти электроны дрейфуют к анодам и образуют хвост, наблюдаемый на рисунке 3.1.14. При коротких импульсах пучка не происходит существенного накопления положительного заряда, и сигнал, вызванный эмиссией электронов, быстро исчезает.

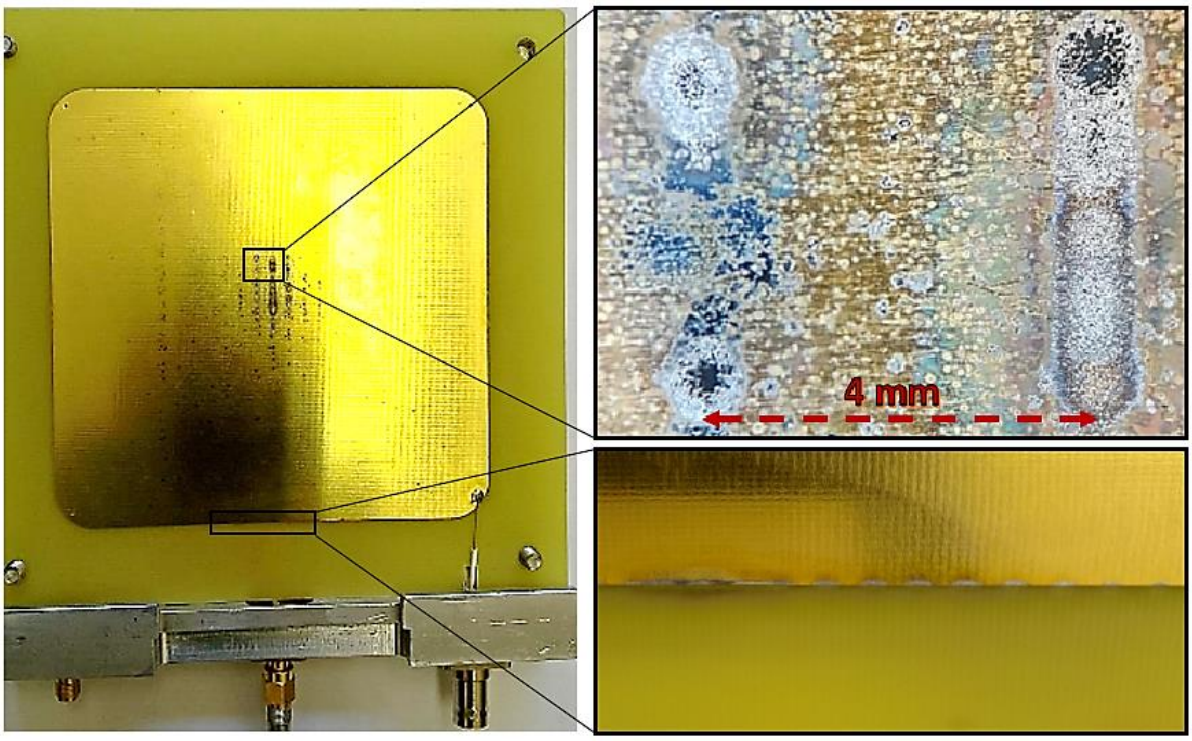


Рисунок 3.1.19 – Фотография деградировавшего катода пропорциональной камеры МГС после нескольких сеансов работы СПО

С учетом вышеизложенных проблем при работе на пучках с высокой импульсной интенсивностью, а также учитывая тот факт, что МГС в описанной конфигурации оказывает заметное влияние на энергетический спектр и среднеквадратичные размеры пучка, что является неприемлемым для работы с пучками, выводимыми на комплекс протонной терапии, была разработана альтернативная конфигурация мультианодного газового счётчика.

Альтернативная конструкция МГС

Альтернативная версия МГС [36] (Рисунок 3.1.20) состоит из 3 печатных плат вместо 5. Материал, ширина, металлическое покрытие и активная область практически такие же, как и в предыдущей версии: стеклотекстолит FR4 толщиной 536 мкм, покрытый с обеих сторон следующими слоями: 18 мкм медь, 4 мкм никель, 0.075 мкм золото. Одна пластина с одинаковыми сплошными квадратными электродами с обеих сторон установлена в середине металлического корпуса и подключена к высоковольтному разъему. Другие две пластины имеют

25 сигнальных полосков шириной 3.9 мм с шагом между ними 0.1 мм. Также имеются два дополнительных полоска по краям активной области с нулевым потенциалом для формирования более однородного электрического поля в активном объеме. Многоканальные пластины имеют диэлектрическое защитное покрытие электрических выводов на сигнальный разъем DB-25. Эти пластины в сочетании с внешними металлическими прижимными накладками и витоновыми уплотнительными кольцами обеспечивают герметичность всего устройства. Также в корпусе сделаны два резьбовых отверстия для продувания объёма счётчика сухим азотом N_2. Зазор между пластинами составляет 8 мм и в основном был выбран из соображений минимизации продольного размера конструкции при сохранении удобства механической сборки. Таким образом, общий объем разделен на две сегментированные ионизационные камеры, измеряющие ток пучка и профили X, Y в режиме ионизации. Ток пучка получается путем суммирования сигналов каждого полоска в программном обеспечении.

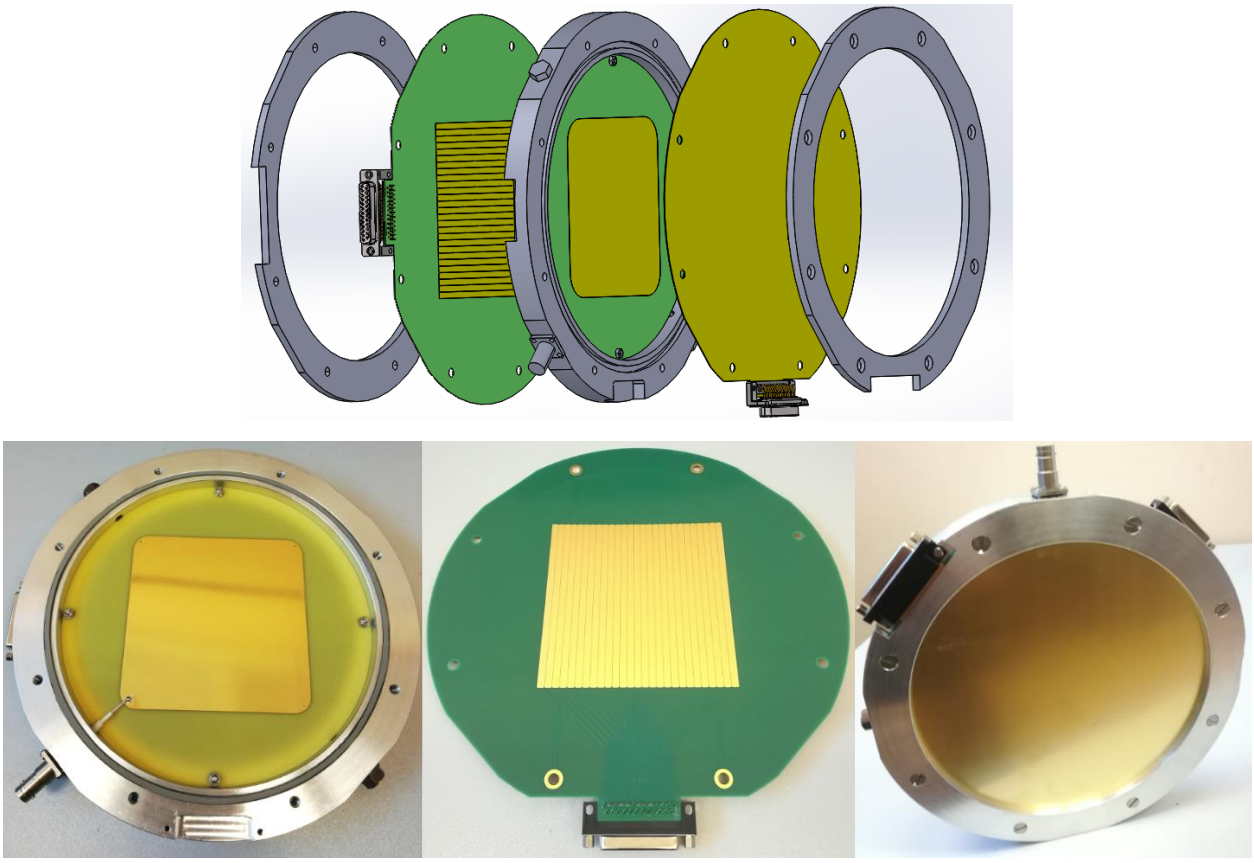


Рисунок 3.1.20 – 3D-модель и фотографии герметичной конфигурации МГС

Герметичная конструкция счётчика позволяет повысить чувствительность измерений за счёт устранения электроотрицательных молекул кислорода и воды, уменьшающих число вторичных электронов в рабочем объеме. Кроме того, отказ от пропорционального режима работы и переход к исключительно ионизационному режиму как для измерений тока, так и для измерений профиля пучка, позволили уменьшить эффекты деградации электродов счётчика при работе с пучками большой интенсивности, увеличивая тем самым общий динамический диапазон детектора.

Обновленный МГС был использован для работы на СПО (Рисунок 3.1.21).

Рисунок 3.1.21 – МГС, установленный на СПО для диагностики пучка во время испытаний оптического спектрометра космических лучей НИУ МФТИ

А также несколько МГС в новой конфигурации были установлены на КПТ. Вывод пучка протонов на воздух в Комплекс протонной терапии осуществляется через выходное алюминиевое окно толщиной 1 мм (рисунок 3.1.22). Контроль положения и профиля пучка на выходном окне осуществляется с помощью люминесцентного экрана (ЛЭ), изображение пучка на котором регистрируется стандартной камерой машинного зрения, синхронизованной с частотой следования импульсов пучка. Для дополнительной диагностики профиля, положения, угла выхода и тока пучка на расстоянии ~1300 мм от экрана установлен мультианодный газовый счётчик.

Результаты проведенного мультифизичного моделирования позволили построить калибровочную зависимость измеряемого сигнала от энергии пучка и использовать прибор в качестве абсолютного измерителя интенсивности пучка в диапазоне $10^6 \div 10^{10}$ протонов в импульсе, при этом номинальное рабочее напряжение ионизационного режима составило 8 кВ.

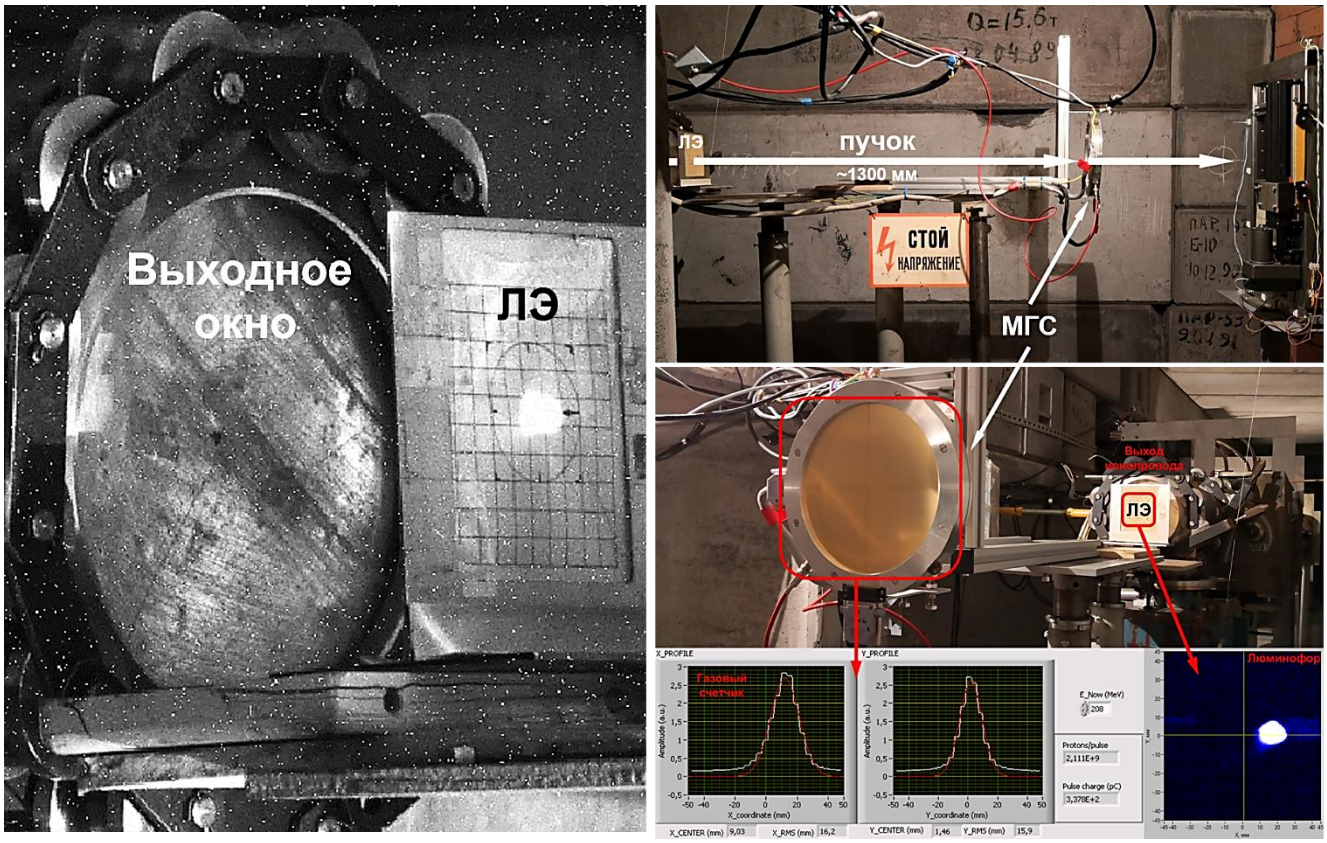


Рисунок 3.1.22 – МГС и люминесцентный экран, установленные на выводе пучка в комплекс протонной терапии ИЯИ РАН

Итоговые эксплуатационные параметры разработанной системы МГС

Благодаря разработке нескольких конфигураций устройства и оптимизации работы электроники мультианодные газовые счётчики, разработанные для диагностики пучков протонов, выведенных на воздух (Рисунок 3.1.23), обладают в совокупности следующими техническими характеристиками:

- пространственное разрешение: 4 мм и может быть улучшено до 1 мм за счет увеличения числа каналов;
- рабочая импульсная интенсивность пучка: $10^7 \div 10^{13}$ протонов в импульсе для измерений профиля, $10^6 \div 10^{10}$ протонов в импульсе для измерений импульсной интенсивности пучка;
- рабочая длительность импульса тока: 5 ÷ 200 мкс;
- рабочая частота следования импульсов: 1 Гц (для интенсивностей $>10^{10}$ протонов в импульсе), до 50 Гц ($<10^{10}$ протонов в импульсе);
- возможность измерения угла отклонения пучка на пролетной базе между двумя МГС для выравнивания выведенного пучка на удаленной мишени.

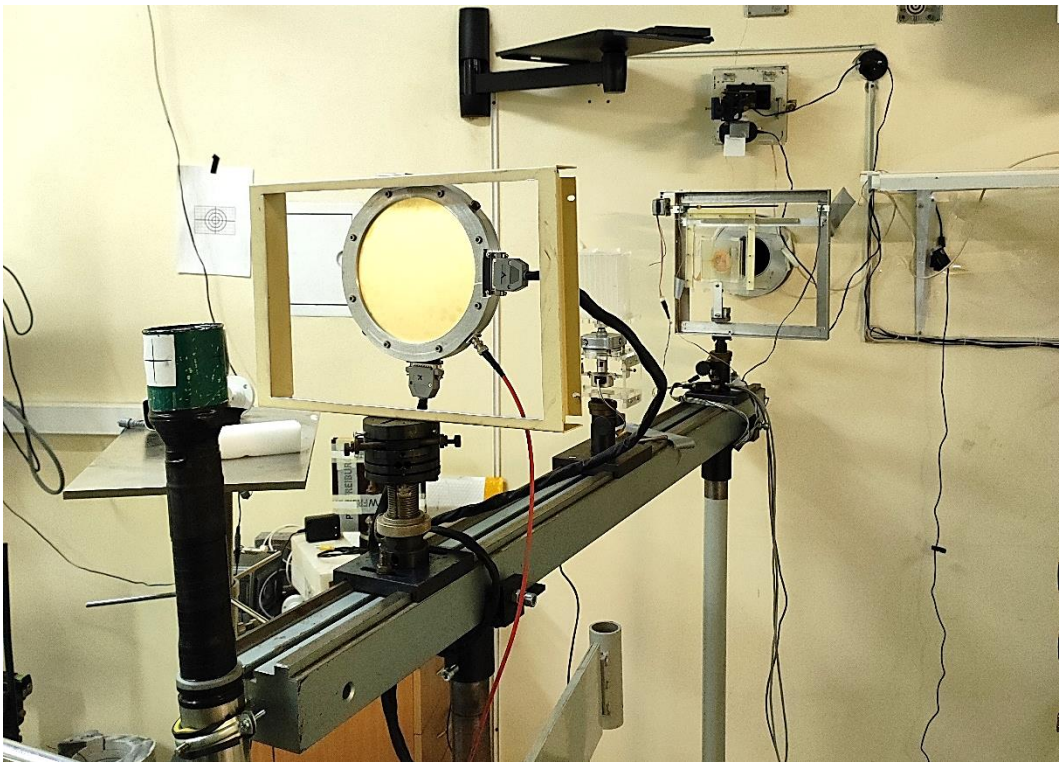


Рисунок 3.1.23 – МГС, установленный на выходе пучка в процедурной КПТ

3.2 *Система диагностики пучков ионов водорода смешанных зарядностей*

Расширенная конфигурация исследовательского стенда облучения на выходе ЛУ ИЯИ РАН показана на рисунке 3.2.1.

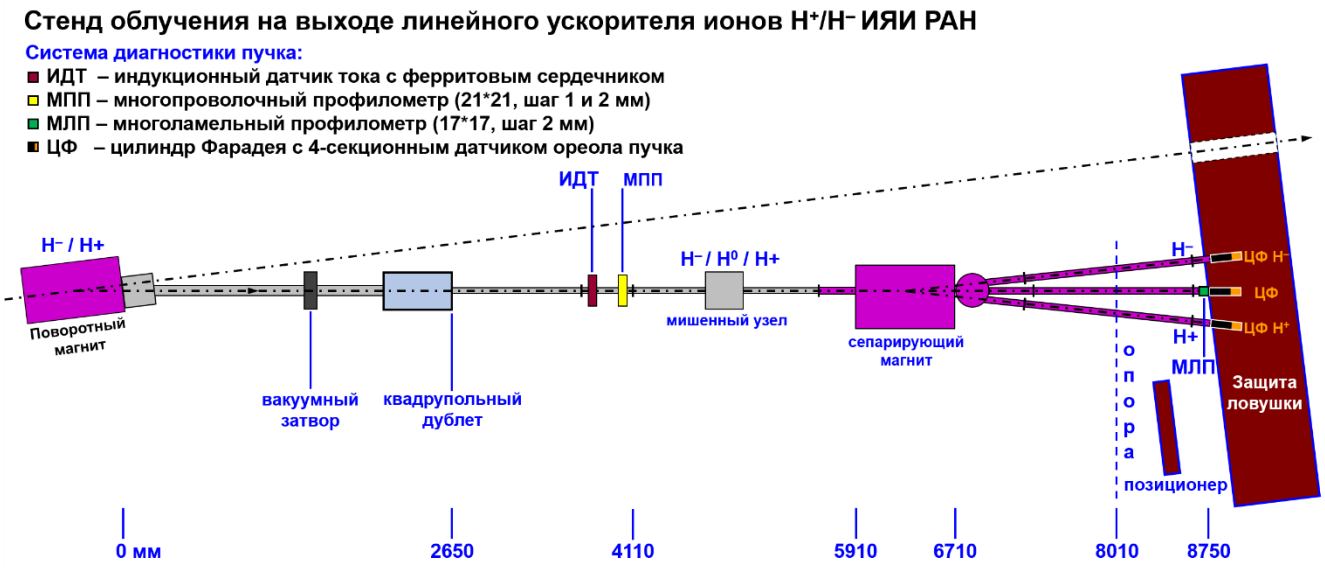


Рисунок 3.2.1 – Конфигурации стенда облучения ИЯИ РАН

ЛУ ИЯИ РАН обладает возможностью ускорять как отдельные пучки H^+ с импульсным током до 15 мА и H^- с импульсным током до 2 мА, так и объединенный пучок частиц H^+/H^-, хотя и с уменьшенными токами обеих компонент в силу сложности ускорения и проводки такого пучка (Рисунок 3.2.2), однако подача объединенного пучка на стенд облучения невозможна, так как стенд смещен от оси ускорителя и поворот пучка на него осуществляется обычным дипольным магнитом.

Для реализации режима облучения объектов пучком частиц с разными зарядовыми состояниями используется специальный мишенный узел с возможностью конверсии ионов H^- в H^0 и H^+. Данный раздел диссертации посвящен системе диагностики, призванной обеспечить контроль получаемых смешанных пучков в широком диапазоне параметров, что востребовано на ускорителях, использующих системы обдирки для ионов H^- или многозарядных ионов.

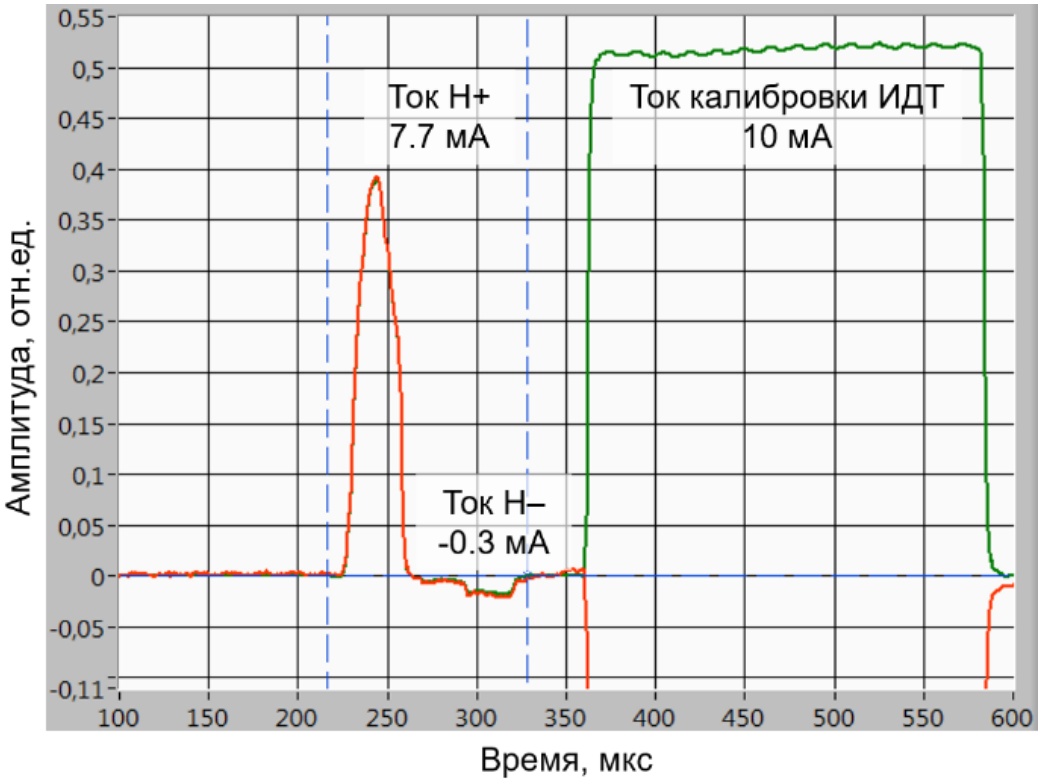


Рисунок 3.2.2 – Токи пучков H^+/H^-, ускоренных до энергии 143 МэВ, измеренные индукционным датчиком тока перед поворотом на стенд облучения ИЯИ РАН

Система диагностики пучков для указанного стенда [13] разделена на две части:

- на входе мишенного узла установлен индукционный датчик тока и многопроволочный профилометр для контроля пучков, подаваемых на стенд,
- после мишенного узла расположен сепарирующий магнит со сменными каналами транспортировки, на выходах которых установлены цилиндры Фарадея, совмещенные с контрольными 4-секционными датчиками ореола пучка, и многоламельный профилометр для контроля прошедших пучков.

Индукционный датчик тока

Установленный индукционный датчик тока для контроля токовых характеристик пучка, выполнен с учётом базовых принципов физико-технической концепции разработки этого типа устройств. Сердечник сделан из ферритового кольца без диэлектрического покрытия фирмы «FerroxCube» T107/65/25-3C11 с одновитковой индуктивностью при нормальных условиях $\sim(11000 \pm 25\%)$ нГн.

В связи с высоким ожидаемым уровнем статических и низкочастотных магнитных полей от различных систем ускорителя, предусмотрено использование многослойной магнитной защиты: внутренний и внешний экраны из магнитных сталей.

Установленный ИДТ (Рисунок 3.2.3) обладает следующими характеристиками:

- суммарный диапазон измеряемой амплитуды импульса тока: 0.02 ÷ 10 мА на основе четырех переключаемых коэффициентов усиления электроники,
- суммарный диапазон измеряемой длительности импульса тока: 0.3 ÷ 150 мкс,
- время нарастания фронта импульса в рабочем диапазоне: ~ 0.1 мкс,
- спад вершины импульса в рабочем диапазоне: ~ 0.02 %/мкс.

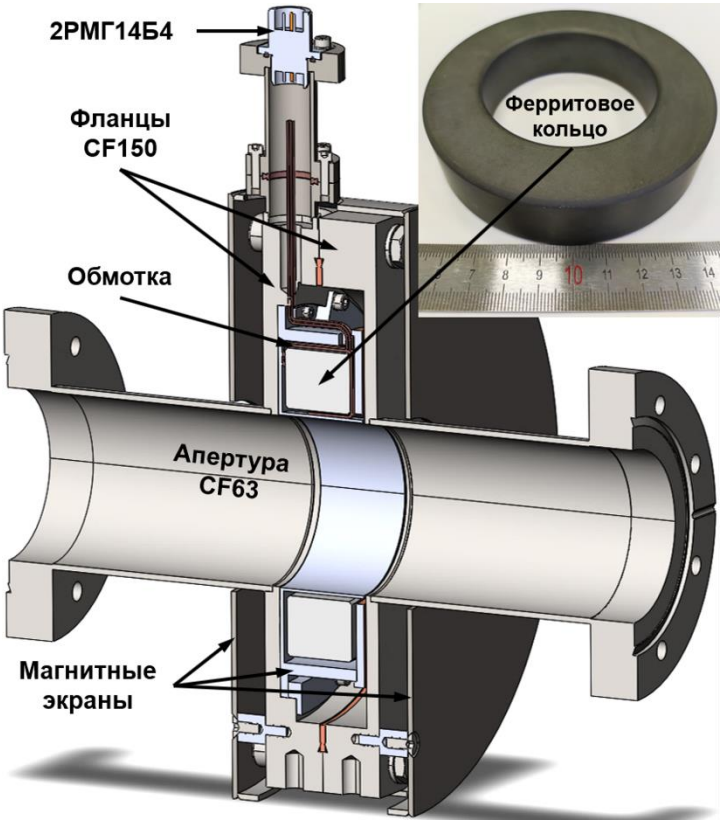


Рисунок 3.2.3 – 3D-схема и фотография сердечника, установленного ИДТ

Многопроволочный профилометр

Для измерений профиля и положения пучка на входе стенда установлен классический многопроволочный профилометр в виде «сетки» (Рисунок 3.2.4), позволяющий проводить измерения профиля по обеим осям в единичном импульсе тока, что необходимо для одноимпульсного режима работы стенда.

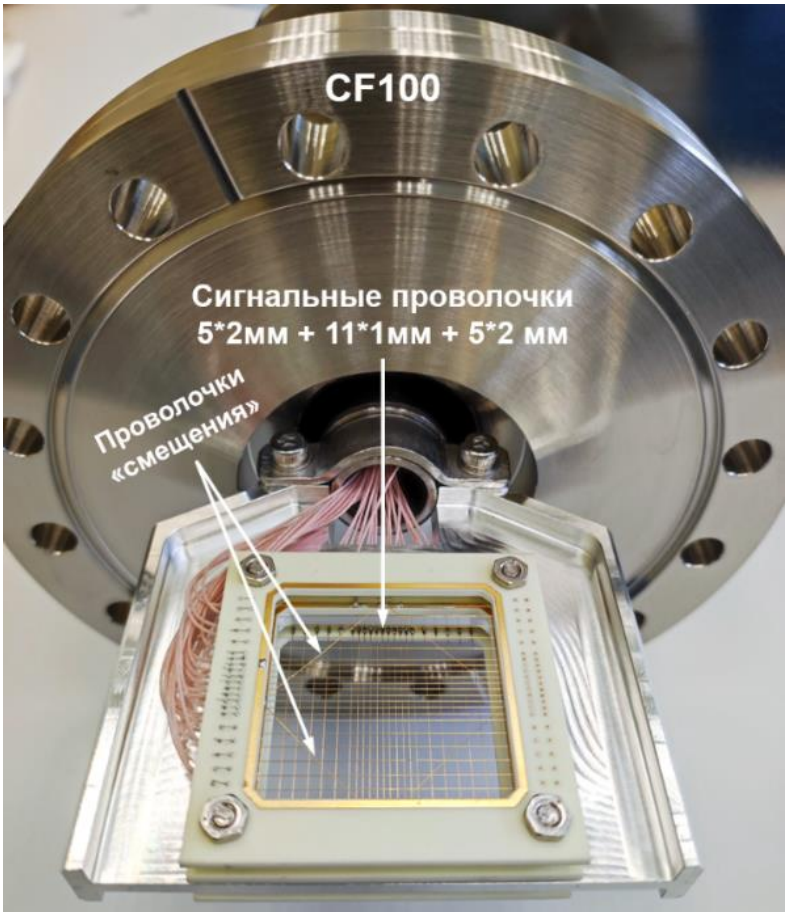


Рисунок 3.2.4 – Фотография сигнальной сборки установленного МПП

Сетка МПП образована 21+21 проволочками диаметром 100 мкм из позолоченного вольфрама, расположенными с переменным шагом 1÷2 мм для достижения большего разрешение в центре апертуры.

Несущие рамки с контактами для проволочек изготовлены в виде печатных плат из керамического ламината. Для борьбы с кросс-токами, возникающими из-за попадания вторичных электронов с одной проволочки на другую, в конструкцию МПП добавлены промежуточные проволочки для формирования потенциала смещения, а также в интегрирующей электронике МПП предусмотрена возможность подавать потенциал смещения до ±300 В непосредственно на сигнальные проволочки. Начиная с энергий ~3 МэВ коэффициент вторичной эмиссии для вольфрама становится меньше единицы, поэтому в случае пучка H^- в электронике заложена возможность смены полярности сигнала для работы с током электронов обдирки, оседающих в проволочках.

Цилиндр Фарадея с датчиком ореола

Для контроля пучков на выходе стенда, после зоны облучения, было разработано несколько конструкций ЦФ: ЦФ для пучков H^-/H^+ с прямым измерением тока заряженных частиц и ЦФ для пучка частиц с произвольным зарядом, включая смесь зарядовых состояний, с дополнительной системой обдирки и последующей прямой регистрации пучка H^+.

ЦФ H^-/H^+ (Рисунок 3.2.5) выполнены на основе стандартных ниппелей CF63, которые играют роль вакуумных корпусов. Регистрирующий узел закреплен во внутреннем кожухе из нержавеющей стали через изолирующие полиимидные (Kapton™) прокладки и состоит из медного (М1) электрода и графитовой вставки, выполненной из изостатического графита С-48.

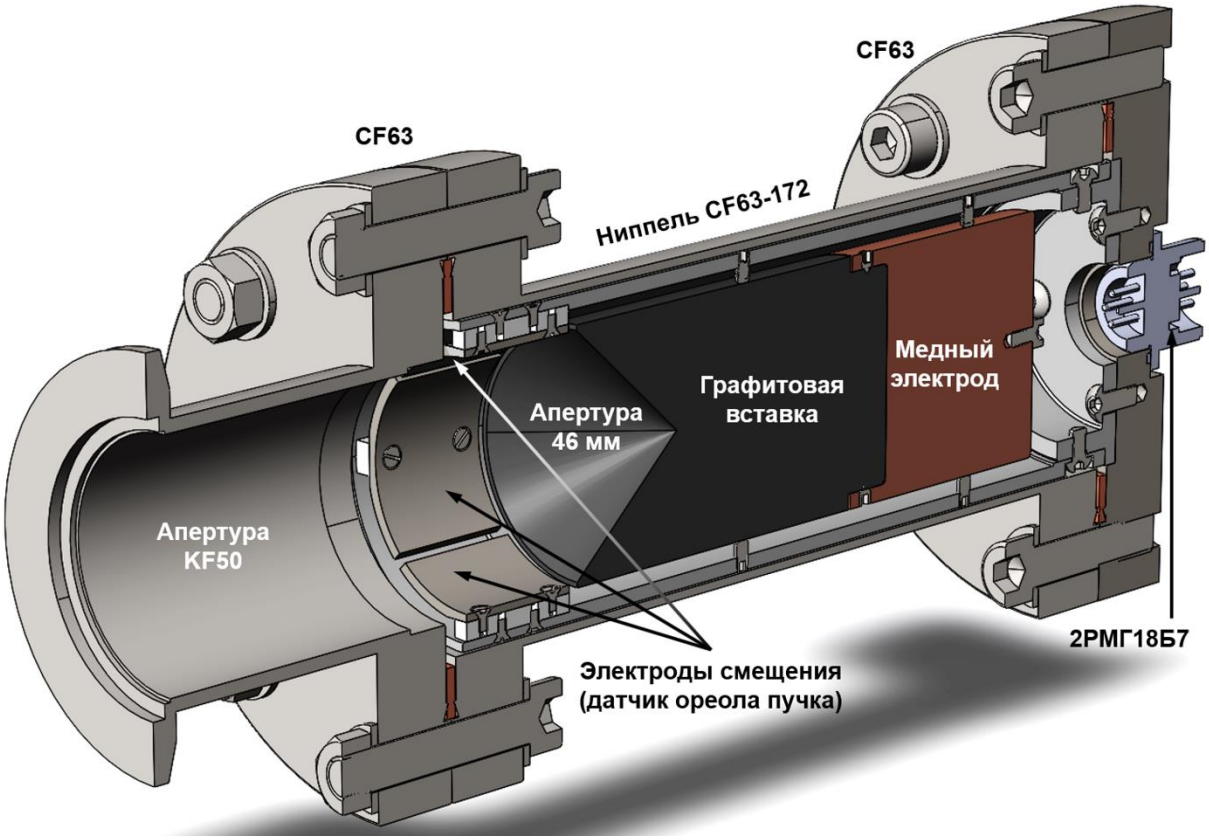


Рисунок 3.2.5 – ЦФ для пучков H^-/H^+ с датчиком ореола пучка

В случае работы с пучками отрицательных ионов водорода присутствует существенный канал утечки измеряемого тока: обратно рассеянные слабосвязанные электроны, которые обдираются в поверхностном слое электрода ЦФ.

Для пучков с энергиями выше нескольких МэВ энергия таких электронов превышает 1 кэВ, и их подавление высоковольтным потенциалом представляет существенную технологическую проблему, поэтому для данного случая необходимо использование магнитной системы и/или сильно вытянутой конусообразной конструкции.

Входная поверхность вставки представляет собой конус с высотой равной диаметру основания, обеспечивая более равномерное распределение ионизационных потерь на поверхности и снижение вероятности импульсной термоэмиссии электронов, а также дополнительно уменьшает эффект утечки тока через обратно рассеянные электроны обдирки и электроны вторичной эмиссии.

Толщина вставки (55 мм) позволяет поглощать ионы водорода с энергией <110 МэВ, таким образом, при работе с максимальной энергией начальной части ускорителя (~100 МэВ), интенсивность нейтронных потоков и мощность дозы наведенной радиоактивности будут снижены. Общая толщина ЦФ (95 мм) рассчитана на энергию пучка ~225 МэВ. При этом суммарный диапазон измеряемой амплитуды импульса тока равен 0.02 ÷ 10 мА на основе четырех переключаемых коэффициентов усиления электроники по аналогии с предусилительной электроникой ИДТ.

Также для минимизации тока утечки обратно рассеянных электронов обдирки предусмотрено квазидипольное магнитное поле (~100 мТл в центре апертуры ЦФ), создаваемое двумя сегментами кольцевого неодимового магнита, закрепленными на внешней поверхности ниппеля над входной поверхностью ЦФ.

Для эффективного подавления низкоэнергетической вторичной эмиссии предусмотрены 4 электрода в виде кольцевых сегментов, на которые подается потенциал смещения до -300 В. Помимо функции смещения электроды формируют позиционно-чувствительный датчик ореола пучка, так как с них через трансимпедансные усилители снимаются токовые сигналы от попадания частиц ореола пучка и электронов вторичной эмиссии. Благодаря этой вспомогательной диагностической функции можно контролировать полное прохождение пучка в

апертуру ЦФ и тем самым гарантировать корректность измерений без использования дополнительного профилометра. Предусилительная электроника этих датчиков регистрирует сигнал обеих полярностей, что позволяет использовать эту функцию и для отрицательных, и для положительных ионов водорода.

Универсальный цилиндр Фарадея (Рисунок 3.2.6) выполнен по аналогичному принципу на основе более длинного ниппеля CF63, для того чтобы можно было разместить дополнительную систему обдирки частиц смешанного многозарядного пучка до состояния H+, совмещенную с многоламельным профилометром, описанным ниже. Частицы пучка, проходя через металлокерамические пластины профилометра суммарной толщиной ~1.7 мм, обдираются со 100%-й вероятностью до протонов, которые и создают сигнальный ток ЦФ. Поток вторичных электронов с выходной поверхности второй пластины МЛП подавлен потенциалом смещения на электродах датчика ореола пучка.

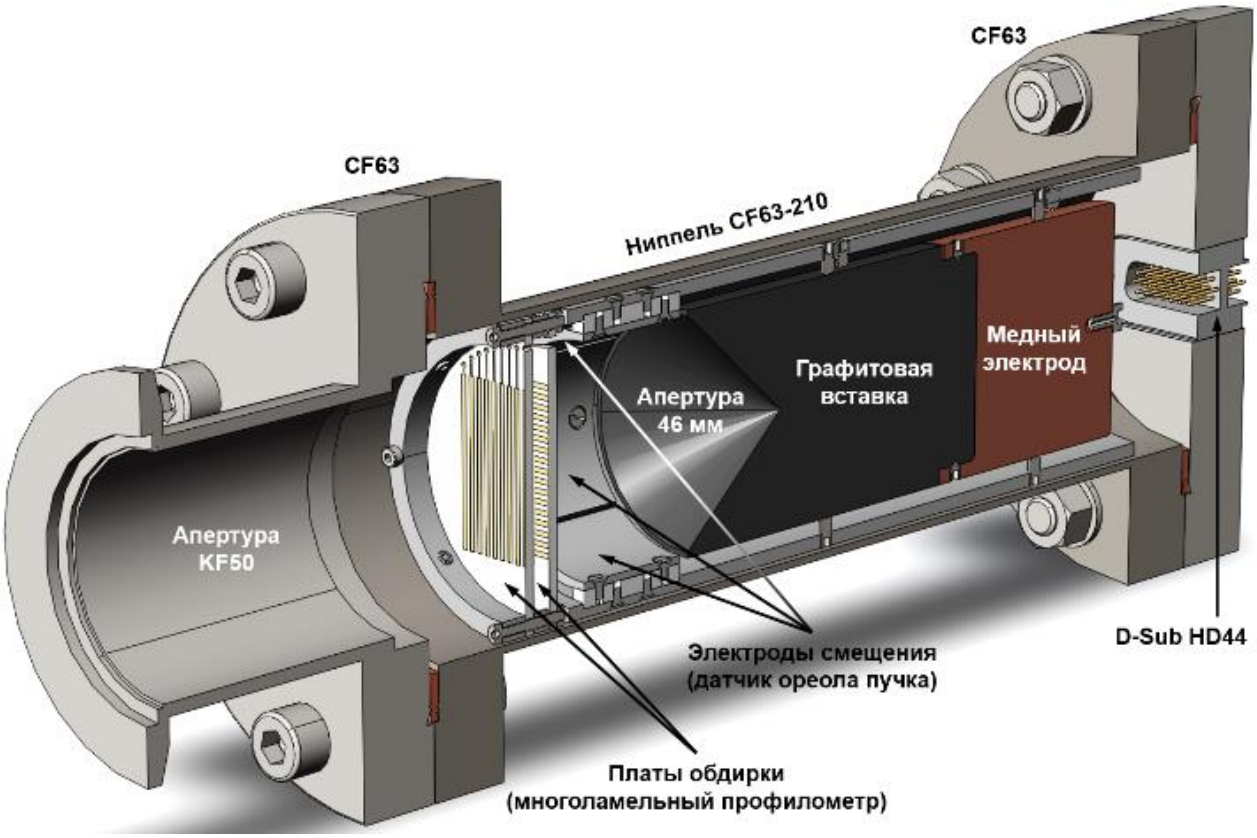


Рисунок 3.2.6 – ЦФ для произвольного зарядового состояния частиц в пучке с датчиком ореола и многоламельным профилометром

Многоламельный профилометр

Многоламельный профилометр предназначен для прямого контроля профиля и положения как пучка частиц с одинаковым зарядом, так и многозарядного пучка на входе в ЦФ, и фактически является разновидностью многопроволочного профилометра, работая на тех же физических принципах, однако, благодаря эффекту обдирки, в первой плоскости профилометра сигнал создается током электронов обдирки, а во второй плоскости – током электронов вторичной эмиссии, порождаемых уже перезаряженным пучком протонов. Профилометр изготовлен на основе двусторонних печатных плат из керамического ламината Rogers RO4003C толщиной 0.813 мм, фольгированного с обеих сторон медной фольгой толщиной 35 мкм с иммерсионным золочением, на которых промышленным способом изготовлено с одной стороны 17 сигнальных дорожек шириной 1 мм с шагом 2 мм, с другой стороны – сплошной электрод размером 34*34 мм (Рисунок 3.2.7). На электрод первой платы подается потенциал смещения до +300 В, что подавляет вторичную электронную эмиссию с самого электрода и дорожек первой платы, но усиливает эмиссию с дорожек второй платы, что и требуется для ее режима работы. Сплошной электрод второй платы, являющийся выходной поверхностью МЛП, заземлен, для того чтобы выход вторичных электронов из него был эффективно подавлен потенциалом смещения на электродах датчика ореола пучка.

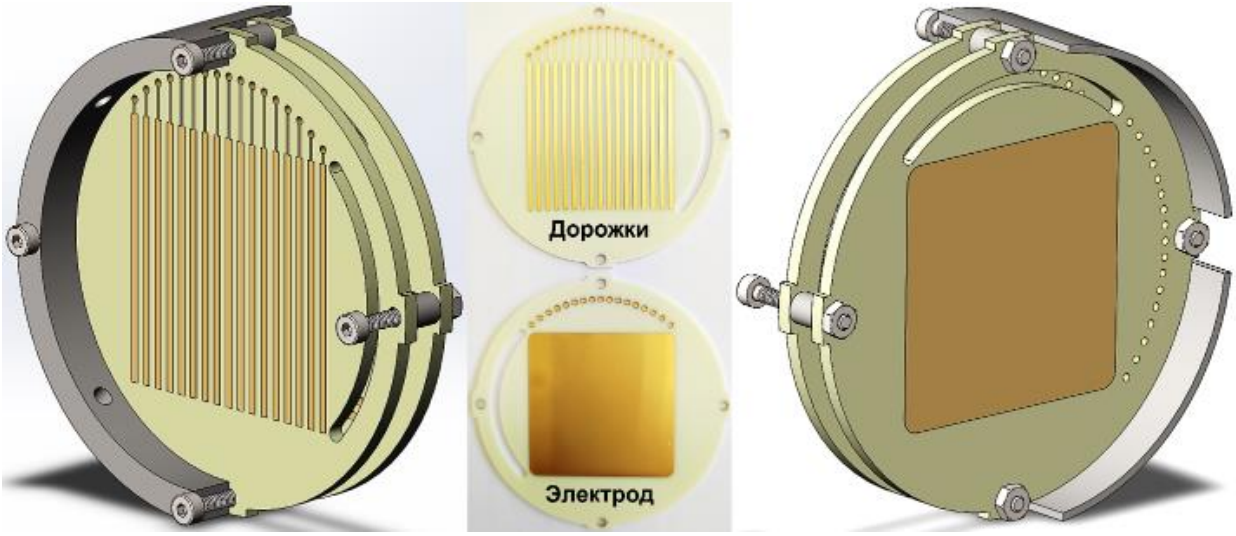


Рисунок 3.2.7 – Модель МЛП и фотография изготовленной платы

Итоговые эксплуатационные параметры разработанной СДП

Благодаря использованию нескольких типов устройств разработанная система диагностики пучков ионов водорода смешанных зарядностей (Рисунок 3.2.8) обладает следующими техническими характеристиками:

- рабочая импульсная интенсивность пучка: $10^7 \div 10^{13}$ ионов в импульсе;
- рабочая длительность импульса тока: 0.3 ÷ 200 мкс;
- пространственное разрешение измерений профиля: 1÷2 мм;
- возможность диагностики пучков ионов водорода с произвольным зарядом H^+ / H^-, включая смесь зарядовых состояний, а также атомарные пучки H^0.

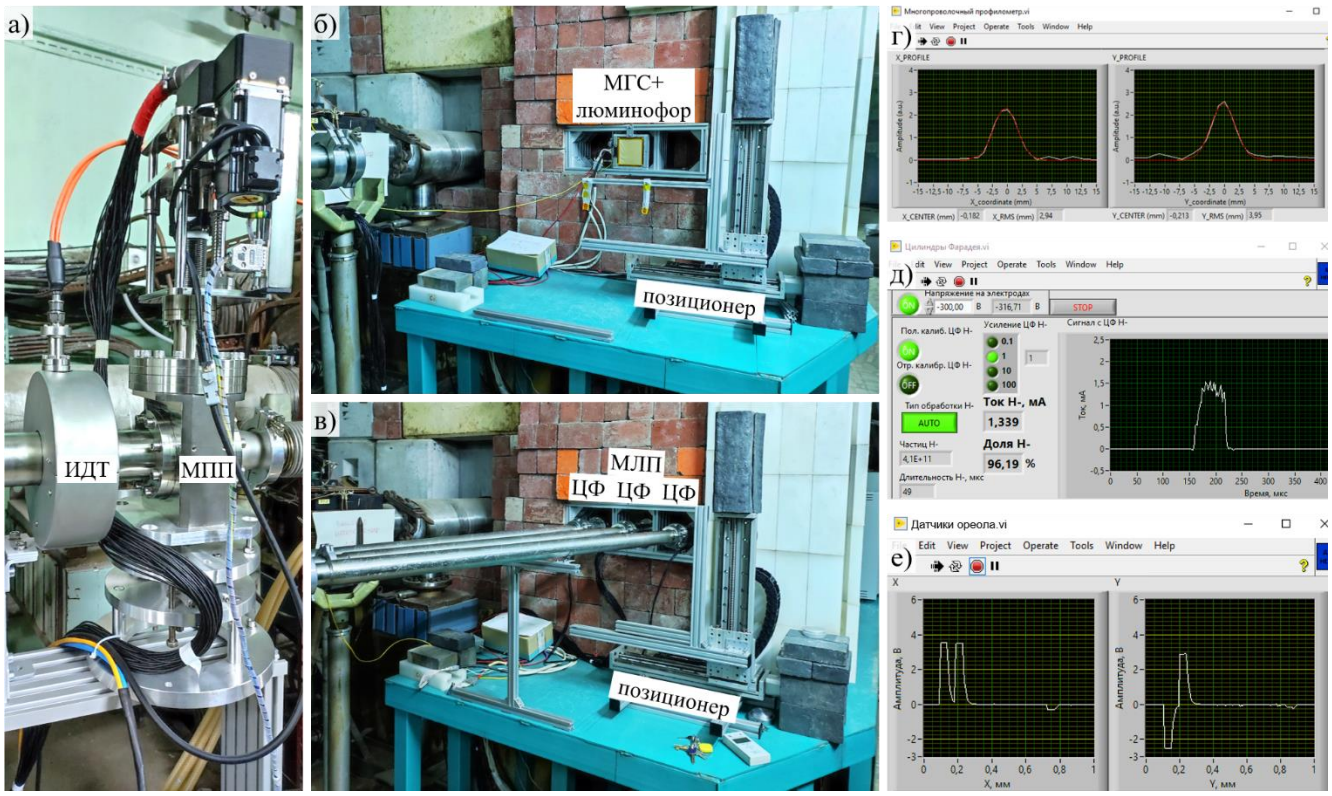


Рисунок 3.2.8 – Фотографии элементов СДП, установленных на стенде облучения: а) сборка ИДТ+МПП; б) сборка МГС + люминесцентный экран для пучков, выведенных на воздух; в) система из трех ЦФ с датчиками ореола + МЛП для контроля пучка, прошедшего через мишенный узел; примеры рабочих окон программ с измеренными сигналами от пучка H^- энергией 143 МэВ: г) профили пучка на МПП, д) ток пучка на ЦФ, е) разнополярные сигналы датчиков ореола пучка на входе в ЦФ

3.3 *Выводы Главы 3*

В Главе 3 описаны процессы разработки, изготовления и настройки оригинальных систем диагностики ионных пучков для стендов облучения на примере установок Ускорительного центра нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН на базе сильноточного линейного ускорителя протонов и отрицательных ионов водорода.

В частности, для стенда протонного облучения и комплекса протонной терапии, где пучки протонов выводятся на воздух, разработаны и реализованы системы диагностики интенсивности, положения и профиля пучка с использованием люминесцентных экранов и мультианодных газовых счётчиков в широком диапазоне интенсивностей от 10^6 до 10^{13} протонов в импульсе. В ходе работ были построены численные физические модели процессов электрон-ионной и ион-ионной рекомбинации в газах, а также показана возможность предварительного расчета коэффициентов усиления счётчиков в ионизационном и пропорциональном режимах работы для составления требований к предусилительно-интегрирующей электронике. Отдельные проблемы, выявленные во время практической эксплуатации на выведенных пучках протонов, были устранены при разработке приборов с обновленной конфигурацией, позволяющей осуществлять диагностику в полном диапазоне токовых и пространственных характеристик пучка ЛУ ИЯИ РАН, в том числе для настройки и контроля пучков, используемых в исследованиях как конвенциональных, так и флэш-режимов протонной терапии онкологических заболеваний.

Также в ходе развития стенда облучения на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН был разработан комплекс устройств диагностики ключевых параметров пучка для исследований по взаимодействию ускоренных пучков заряженных частиц с веществом. Отличительной чертой разработанной системы диагностики является возможность работы с пучками частиц в разных зарядовых состояниях, включая смесь зарядовых состояний, а также атомарные пучки H^0,

во всём диапазоне энергий и интенсивностей пучков, подаваемых на стенд. Индукционный датчик тока и многопроволочный профилометр, установленные на входе в стенд, позволяют измерять ток и профили пучка частиц. На выходе стенда установлены цилиндры Фарадея, в которых для повышения точности и надёжности проводимых измерений реализован как набор классических методик для оптимизации их работы, так и нестандартные решения, например, датчики ореола пучка, позволяющие контролировать полное прохождение пучка в апертуру ЦФ и тем самым гарантировать корректность токовых измерений на длинных пролетных базах стенда без использования дополнительных профилометров. Также на входе одного из цилиндров установлен многоламельный профилометр на основе печатных плат из керамического ламината, выполняющий функцию перезарядной мишени для возможности регистрации тока многозарядного пучка, образующегося на стенде в некоторых режимах облучения. Пучок смешанных зарядовых состояний полностью обдирается в пластинах профилометра до протонов, создающих сигнальный ток ЦФ, при этом сам профилометр позволяет регистрировать профиль многозарядного пучка.

Для всех предложенных устройств разработан полный комплект электроники: предварительные усилители ЦФ и ИДТ, интеграторы и коммутаторы профилометров, датчиков ореола и многоанодных газовых счётчиков, источники напряжения смещения, а также платы контроля и управления нижнего уровня для считывания сигналов и ручного управления коэффициентами усиления, напряжениями смещения и сигналами калибровки.

Результатом выполненных работ стало приборно-методическое обеспечение научных и прикладных исследований по облучению объектов пучками ионов водорода с заданными параметрами в широком диапазоне интенсивностей и энергий.

ГЛАВА 4
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ

Базовые методики диагностики пучка не всегда оказываются достаточными для успешной эксплуатации крупных ускорительных комплексов, поэтому в процессе достижения проектных параметров начинают появляться оригинальные, ранее не запланированные методы диагностики пучков.

4.1 Неразрушающая диагностика разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения

Как было показано в Главе 1, основная идея ёмкостных датчиков положения заключается в измерении зарядов, индуцируемых электрическим полем пучка заряженных частиц на изолированных проводящих пластинах. Для сгруппированных пучков, обладающих микроструктурой, эти измерения выполняются с использованием высокочастотных методов, так как отклик таких датчиков возникает только на гармониках частоты следования сгустков пучка. Однако в случае разгруппированного пучка, движущегося по инерции (англоязычный термин: coasting beam), традиционный подход к использованию ёмкостных датчиков не работает, и, например, в циклических машинах для многооборотной поперечной диагностики таких пучков иногда используют специальные спектрометры Шоттки, при этом задача измерения квазистационарного заряда в течение всего макроимпульса для неразрушающего контроля положения пучка в протяженных каналах транспортировки является серьезной диагностической проблемой.

Например, в ускорительном комплексе ИЯИ РАН ускоренный пучок транспортируется на расстояние около 400 м к исследовательским установкам и из-за разброса по импульсам ($\Delta p/p \approx \pm 3.5 \cdot 10^{-3}$) полностью теряет свою микроструктуру ($T_{Bunch} \approx 200$ пс, $f_{RF} = 198.2$ МГц).

Кроме того, по историческим причинам апертура каналов транспортировки в исследовательском комплексе составляет ~180 мм, а полный размер пучка может достигать 100 мм [20]. Таким образом, возникает задача диагностики положения широких разгруппированных пучков в пределах большой апертуры ионопровода. Для решения этой задачи был предложен и реализован метод диагностики на основе линейно-разрезных датчиков положения пучка (Р-ДПП), называемых также электростатическими пикапами (Рисунок 4.1.1) [2, 17, 19].

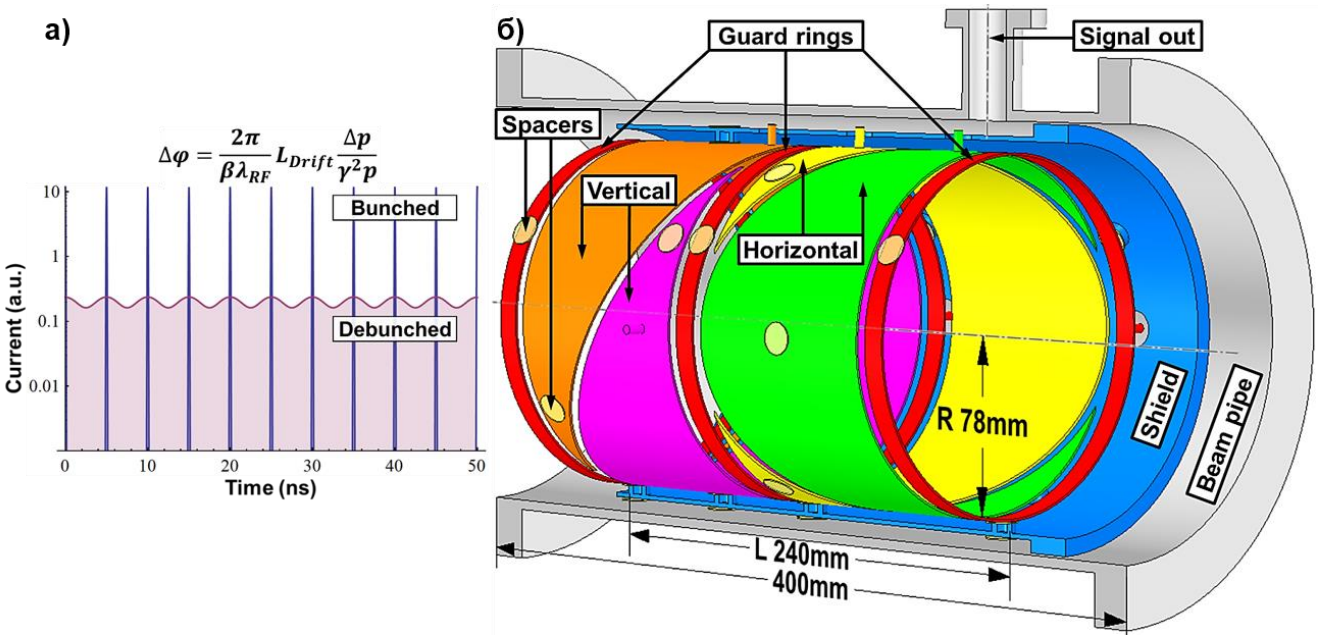


Рисунок 4.1.1 – а) Изменение микроструктуры пучка в процессе дрейфа.
б) Трехмерная модель электростатического пикапа (Р-ДПП)

Конструктивные особенности Р-ДПП

Линейно-разрезные датчики положения, установленные в каналах транспортировки исследовательского комплекса ИЯИ РАН, были изготовлены в ИФВЭ им. А. А. Логунова НИЦ «КИ» (Протвино) на этапе строительства исследовательского комплекса ИЯИ РАН в 90х годах прошлого века для работы со стандартными сгруппированными пучками, которые планировалось подавать в накопительное кольцо, однако на практике ни разу не использовались, так как проект постройки накопителя на базе ЛУ ИЯИ РАН не был реализован.

Датчики состоят из двух пар цилиндрических разделительных электродов (горизонтального и вертикального) с так называемым "линейным разрезом". Проекция разреза между соседними электродами на вертикальную и горизонтальную плоскости представляет собой диагональную линию.

Три заземленных защитных кольца минимизируют эффекты асимметричных краевых полей и уменьшают кросс-токи между парами электродов. Электроды и кольца изолированы от заземленного экрана с помощью прокладок из слюды, а экран, в свою очередь, изолирован от внешнего вакуумного корпуса. Индуцируемые на электродах сигналы передаются по изолированным проводам к общему разъему на сигнальном выходе.

Известно, что в линейно-разрезных датчиках индуцированные заряды пропорциональны фактической длине пластины на координате положения центра масс пучка. В идеальном двумерном электростатическом приближении для цилиндрических разрезных электродов с внутренним радиусом R положение пучка традиционно определяется отношением разности зарядов к их сумме Δ/Σ (аббревиатура, используемая в данной главе – DoS), но на практике из-за ёмкостной связи между соседними электродами и асимметрии электрического поля на их краях измеряемое положение пучка определяется, как:

$$X = K_X \frac{\Delta Q_{\text{горизонталь}}}{\sum Q_{\text{горизонталь}}} + \delta_X, \qquad Y = K_Y \frac{\Delta Q_{\text{вертикаль}}}{\sum Q_{\text{вертикаль}}} + \delta_Y, \tag{4.1}$$

где K_X, K_Y – обратные чувствительности датчика (чем меньше K, тем больше DoS для одного и того же положения пучка), и δ_X, δ_Y – смещения геометрического центра относительно электрического центра, определяемого как $\Delta Q = 0$.

Хорошо известная высокая линейность сигнала в большей части апертуры датчика и высокая чувствительность делают электростатический линейно-разрезной датчик оптимальным устройством контроля положения пучка в условиях широкоапертурных каналов транспортировки ускорительного комплекса ИЯИ РАН, при условии реализации метода измерения разгруппированных пучков.

Параметры электроники Р-ДПП

Измерения на основе Р-ДПП требуют преобразования индуцированного пучком заряда в напряжение. Как правило, заряд пластины Q_p интегрируется с общей емкостью датчика C_p, создавая напряжение $V_p = \frac{Q_p}{C_p}$.

Затем для обеспечения усиления используется усилитель напряжения (Рисунок 4.1.2 а), где C_p состоит из емкости сигнальной пластины по отношению к заземленному экрану (~110 пФ для данной конструкции датчиков) и емкости соединительного кабеля. Альтернативный вариант – одновременное преобразование и усиление с помощью усилителя заряда (Рисунок 4.1.2 б).

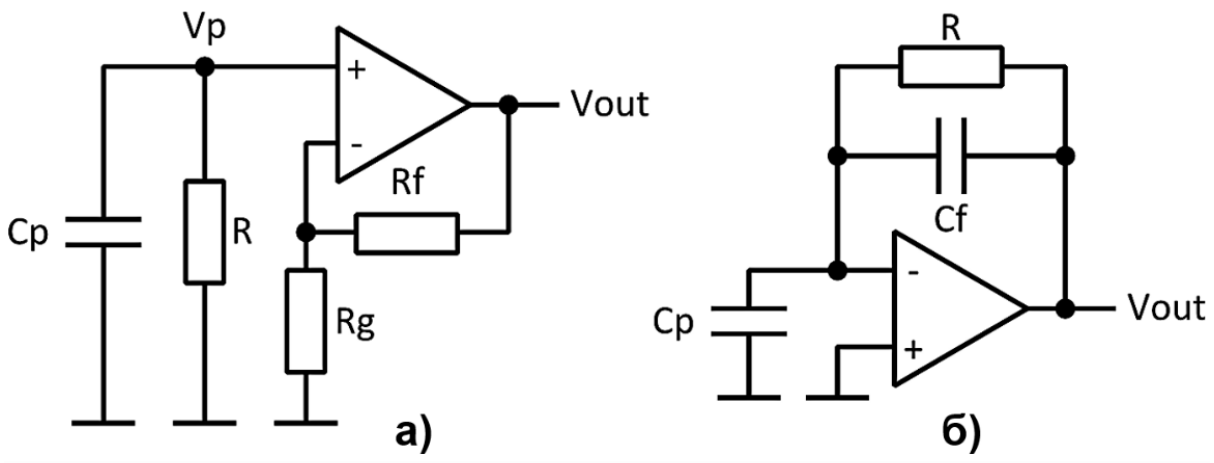


Рисунок 4.1.2 – а) Схема усилителя напряжения б) Схема усилителя заряда

Особенности обоих методов обобщены в таблице 4.1.1. В отличие от усилителя напряжения, приводящего к появлению плавающих потенциалов на сигнальных электродах, усилитель заряда постоянно поддерживает электроды при нулевом потенциале. Его выходное напряжение всегда равно $V_{out} = -\frac{Q_p}{C_f}$ и зависит только от емкости обратной связи C_f, поэтому калибровку датчика можно выполнять с помощью кабеля произвольной длины. Строгий расчет коэффициента усиления для усилителя заряда требует рассмотрения нескольких эквивалентных схем (Рисунок 4.1.3).

Таблица 4.1.1 – Сравнение параметров усилителей напряжения и заряда

	Усилитель напряжения	**Усилитель заряда**
Коэффициент усиления	$G = 1 + \frac{R_f}{R_g}$	$G = -\frac{C_p}{C_f}$
Усиление шума	$NG = 1 + \frac{R_f}{R_g}$	$NG = 1 + \frac{C_p}{C_f}$
Выходное напряжение	$V_{out} = G \cdot V_p = \frac{Q_p}{C_p} \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right)$	$V_{out} = -\frac{Q_p}{C_p} \cdot \frac{C_p}{C_f} = -\frac{Q_p}{C_f}$

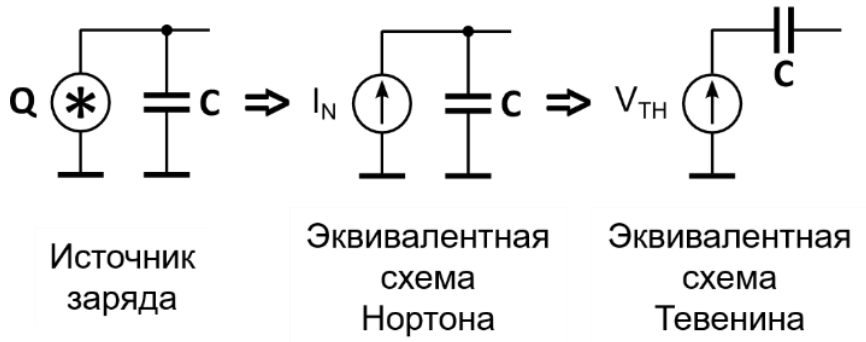


Рисунок 4.1.3 – Эквивалентные схемы источника заряда

Исходный источник заряда передает заряд *Q* в конденсатор *C*. Этот процесс может быть описан эквивалентной схемой Нортона с источником тока $\mathrm{I_N(t)}$, передающим тот же самый заряд $\mathrm{Q} = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{I_N(t)dt}$. Если предположить, что передача заряда происходит мгновенно, то импульс источника тока имеет вид дельта-функции $\delta(\mathrm{t})$, тогда, зная, что $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\mathrm{t})\mathrm{dt} = 1$, можно записать источник тока $\mathrm{I_N(t)} = \mathrm{Q} \cdot \delta(\mathrm{t})$, так как $\int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{I_N(t)dt} = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{Q} \cdot \delta(\mathrm{t})\mathrm{dt} = \mathrm{Q}$. Используя преобразование Лапласа для $\mathrm{I_N(t)}$, где $\delta(\mathrm{s}) = 1$, получаем $\mathrm{I_N(s)} = \mathrm{Q}$. Теперь можно перейти к эквивалентной схеме Тевенина, где $\mathrm{V_{TH}(s)} = \mathrm{I(s)} \cdot \mathrm{Z_C} = \frac{1}{\mathrm{s}} \cdot \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{C}}$, где множитель $\frac{1}{\mathrm{s}}$ соответствует функции *u(t)* с единичным шагом во временной области. Это означает, что входной сигнал для рассматриваемого усилителя представляет собой единичный шаг напряжения с амплитудой $\frac{\mathrm{Q_p}}{\mathrm{C_p}}$. Тогда коэффициент усиления по напряжению равен $\mathrm{G} = -\frac{\mathrm{Z_F}}{\mathrm{Z_G}} = -\frac{1/(\mathrm{sC_f})}{1/(\mathrm{sC_p})} = -\frac{\mathrm{C_p}}{\mathrm{C_f}}$, а выходное напряжение равно $\mathrm{V_{out}} = \mathrm{G} \cdot \mathrm{V_{TH}} = -\frac{\mathrm{Q_p}}{\mathrm{C_f}}$.

Следует отметить, что при одном и том же выходном напряжении усилитель напряжения имеет меньший уровень шума, чем усилитель заряда, но эта разница уменьшается при больших коэффициентах усиления.

Для работы с Р-ДПП был собран усилитель заряда с использованием операционного усилителя с JFET-входами и C_p = 110 пФ, C_f = 10 пФ, R = 100 МОм. При коэффициенте усиления второго каскада равном 10 и входном шуме $16\,\frac{\text{нВ}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ выходной шум составляет 15 мВ между максимальным и минимальным пиковыми значениями (peak-to-peak).

Высокоомный резистор R определяет коэффициент усиления по постоянному току и обеспечивает прохождение тока смещения, формируя, параллельно с C_p или C_f, фильтр верхних частот, который вызывает спад вершины регистрируемого импульса по аналогии с индукционным датчиком тока. Небольшое ослабление можно считать линейным и компенсировать простым алгоритмом восстановления базовой линии после оцифровки. Помимо емкости C_p "пластина-земля", существует емкость, которая состоит из емкости "пластина-пластина" (равной несколько пФ для используемой конфигурации) и взаимной емкости между сигнальными проводами. Для усилителя заряда эта емкость включается в контур обратной связи и увеличивает коэффициент усиления шума для дифференциального сигнала. Следовательно, время нарастания импульса дифференциального сигнала оказывается больше, чем импульса суммарного сигнала.

ВЧ составляющая сигнала из-за остаточной модуляции пучка находится за пределами полосы пропускания усилителя. Следовательно, в первом приближении выходной сигнал усилителя соответствует постоянной составляющей электрического поля пучка, которая определяется его импульсным током. Удобной особенностью DoS-измерений является то, что синфазный шум вычитается из более слабого сигнала, соответствующего положению пучка, и не портит его. Тем не менее, предусилитель содержит высокоомные компоненты и должен быть надлежащим образом экранирован от внешних помех.

Лабораторные испытания Р-ДПП

Для измерения фактических коэффициентов K_X, K_Y и δ_X, δ_Y были проведены тестовые лабораторные испытания датчиков (Рисунок 4.1.4).

Рисунок 4.1.4 – Фотография Р-ДПП во время лабораторных испытаний

Для стендовой имитации широкого протонного пучка использовалась медная трубка диаметром 10 мм, устанавливаемая внутри Р-ДПП с точностью ±0.5 мм, через которую от генератора сигналов пропускались прямоугольные импульсы напряжения 500 мВ, 100 мкс, 50 Гц. Как и ожидалось, полученные результаты не зависят от общей емкости датчика, а проведенные на основе такой имитации тестовые измерения показывают высокую линейность значения DoS во всей апертуре тестируемых Р-ДПП в пределах ±0.5%.

Для того чтобы учесть неравномерное усиление между четырьмя каналами усилителя заряда, выполнялась предварительная калибровка схемы с помощью эталонного конденсатора Kistler 5371A, и полученные поправочные коэффициенты применялись после оцифровки сигналов перед вычислением величины DoS.

Расчетно-модельные оценки рабочих характеристик Р-ДПП

Провода или металлические трубки наиболее часто используются в качестве имитаторов пучка для стендовых измерений емкостных датчиков положения, однако очевидно, что проводящий объект с равномерным распределением квазистационарного электрического потенциала по поверхности не может быть эквивалентом распределения заряженных частиц в пучке. Поэтому для электростатических датчиков наилучшим вариантом предварительной калибровки является численный эксперимент, основанный на трехмерном моделировании.

Численная физическая модель Р-ДПП была построена в ANSYS на основе адаптивной сетки, содержащей около 10^6 тетраэдров (Рисунок 4.1.5)

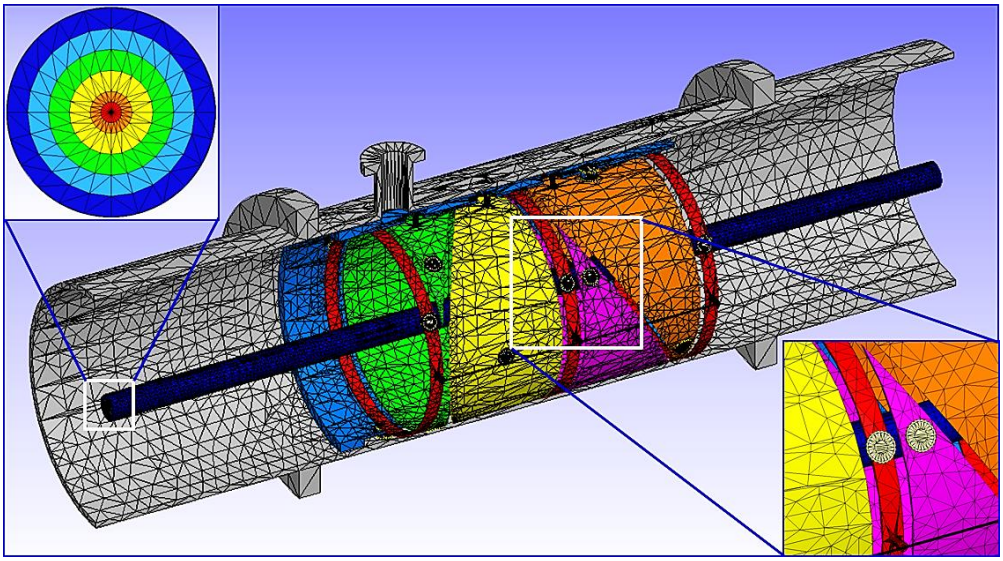


Рисунок 4.1.5 – Трёхмерная модель Р-ДПП и пучка частиц в ANSYS

Первичная верификация модели осуществляется воспроизведением результатов измерений на тестовом стенде с использованием медной трубки. Результаты хорошо согласуются друг с другом для обеих плоскостей, воспроизводя имеющуюся небольшую асимметрию электрического поля, вызванную асимметричным расположением электродов относительно краев экрана. Также подтверждается независимость результатов от общей емкости датчика, в связи с чем не требуется точная подгонка емкости в модели, контролируемой в основном расположением диэлектрических прокладок.

Таким образом, после экспериментальной верификации модели ее можно использовать для дальнейшего углубленного анализа. Для уменьшения краевых эффектов область моделирования пучка и длина ионопровода были расширены. Моделируемый пучок имел двумерное нормальное распределение с σ_{beam} = 2 мм Общий заряд соответствовал импульсному току 10 мА. Моделирование показывает (Рисунок 4.1.6), что распределение потенциала на внешней границе пучка значительно отличается от равномерного распределения потенциала на поверхности проводящей трубки, и это различие увеличивается со смещением пучка к сигнальному электроду (максимум до 50%).

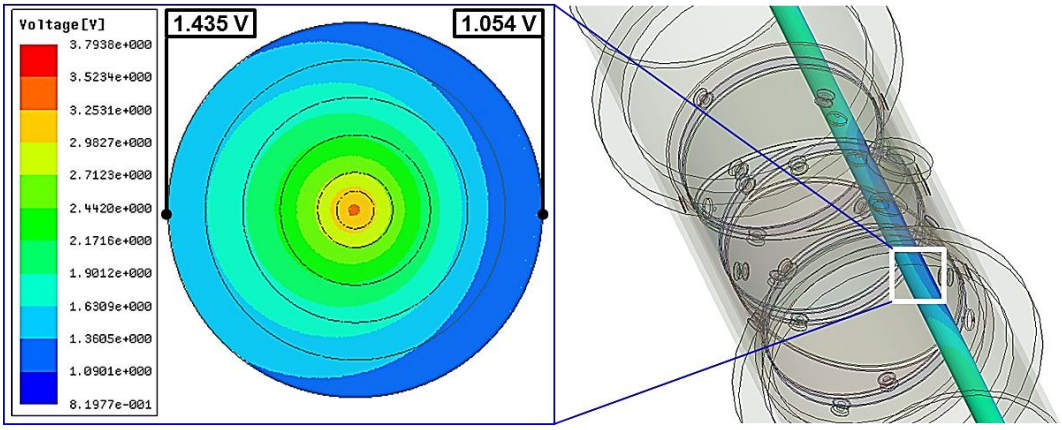


Рисунок 4.1.6 – Распределение электрического потенциала в пучке протонов с σ_{beam} = 2 мм и положением (X_C = 60 мм, Y_C = 0)

Этот эффект обеспечивает ожидаемые качественные изменения в сигнальных откликах электродов: зависимости суммарного и разностного сигналов теряют нелинейный характер, в то время как зависимость DoS сохраняется полностью (Рисунок 4.1.7 а). Кроме того, наблюдается изменение зависимости разрешения: оно ухудшается вместе со смещением положения пучка, но не превышает величину $\Delta X < 130$ мкм в апертуре ±65 мм при типичном импульсном токе 10 мА (Рисунок 4.1.7 б). Следовательно, стендовые измерения с использованием токопроводящей трубки подходят для базовой калибровки электростатического датчика по величине DoS, но численное 3D-моделирование является важным дополнением для количественной оценки других характеристик датчика.

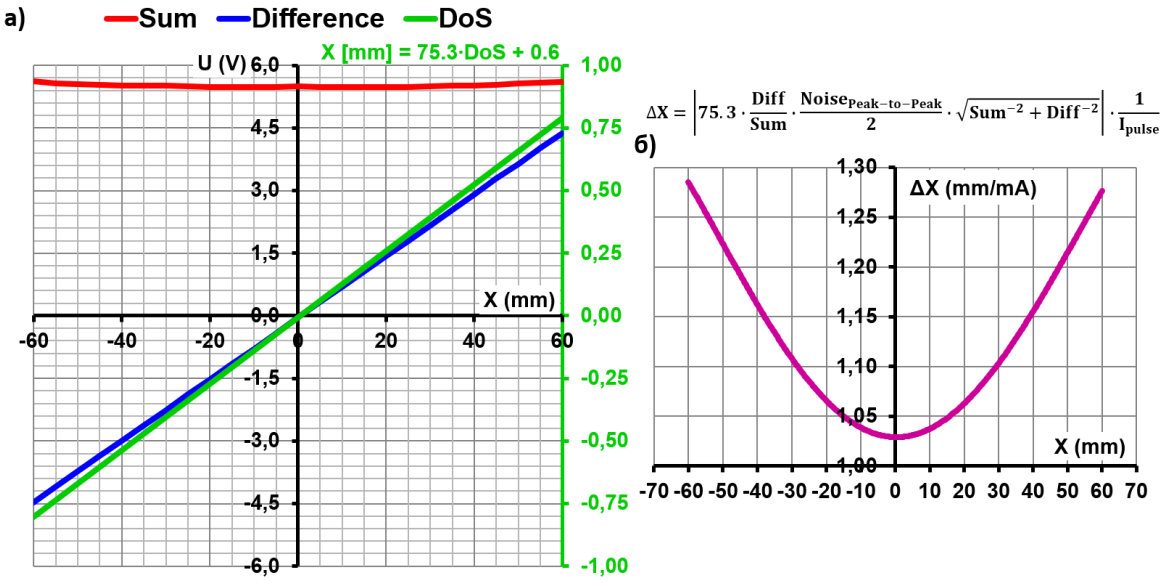


Рисунок 4.1.7 – а) Модельная калибровка Р-ДПП для горизонтальной оси

б) Модельная оценка разрешающей способности Р-ДПП по горизонтальной оси

Поскольку положение, среднеквадратичный размер и импульсный ток пучка могут изменяться во время работы ускорителя, необходимо сравнивать результаты для различных типичных случаев (Рисунки 4.1.8, 4.1.9). Это позволяет лучше понять точность измерений положения и проясняет дополнительные измерительные возможности.

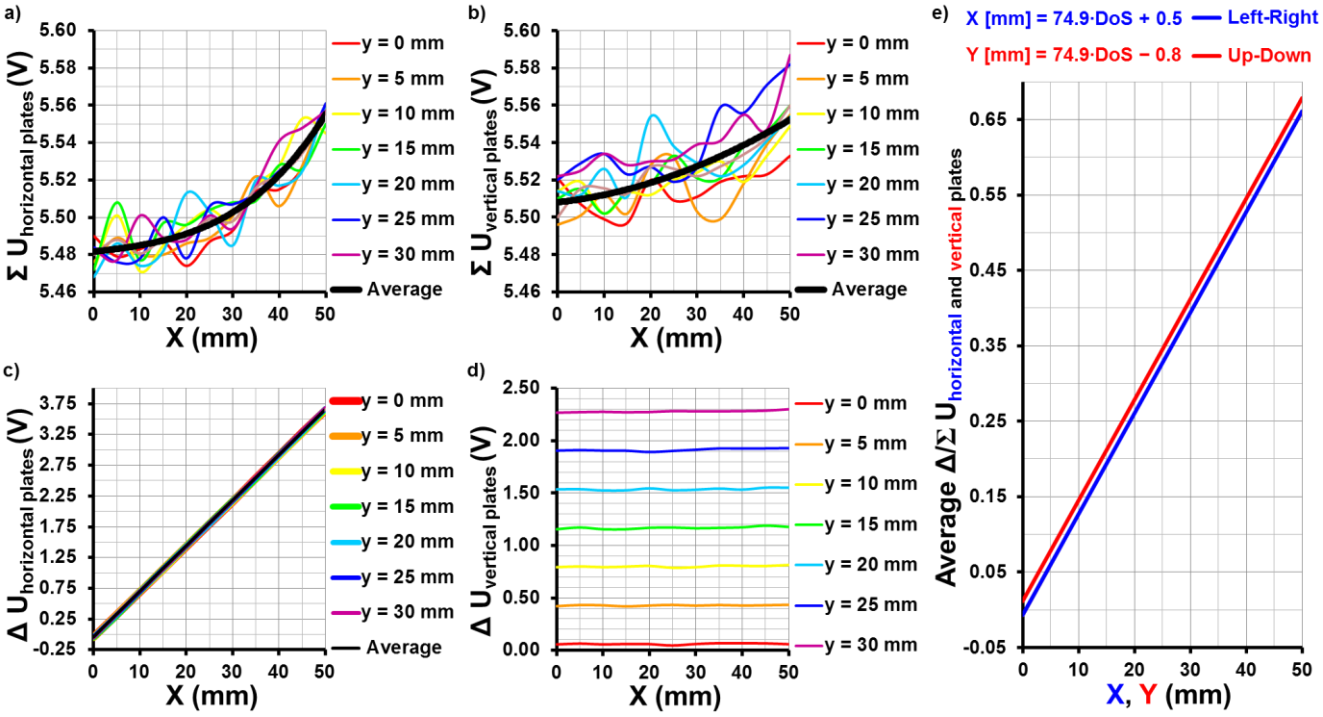


Рисунок 4.1.8 – Сравнительные модельные результаты для разных смещений пучка

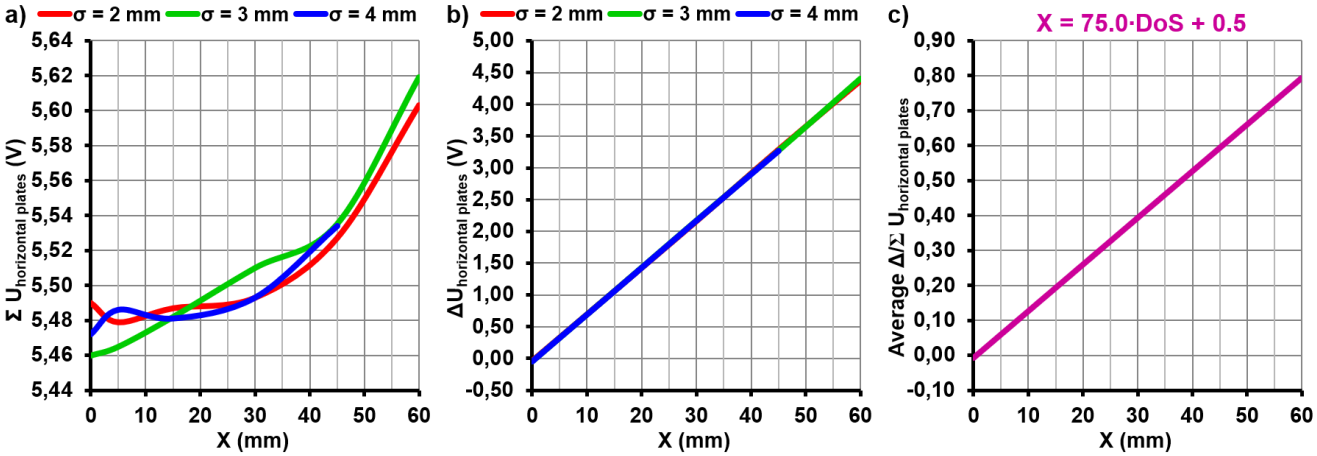


Рисунок 4.1.9 – Сравнительные модельные результаты для разных среднеквадратичных размеров пучка при сохранении общего числа частиц

Сравнительное моделирование сигналов Р-ДПП для разных среднеквадратичных размеров пучка при сохранении общего числа частиц показывает самосогласованность результатов. Кроме того, отклики электродов прямо пропорциональны импульсному току пучка, как и ожидалось. В результате возможность работы Р-ДПП в режиме датчика тока подтверждена в численном эксперименте. Расчетный суммарный отклик для измерений тока равен ~ 550 мВ/мА. Следовательно, разрешение измерений тока при шуме ±7.5 мВ составляет около 30 мкА. Отклонения суммарного сигнала из-за положения пучка и среднеквадратичного размера составляют менее 0.5%. Относительная погрешность измерений тока составляет менее 3% и в основном определяется нелинейной зависимостью суммарного сигнала.

Пучковые испытания Р-ДПП и измерения параметров пучка

Итоговая проверка общей работоспособности системы диагностики разгруппированных пучков на основе Р-ДПП была выполнена во время проведения плановых сеансов работы ЛУ ИЯИ РАН на исследовательские установки. Два Р-ДПП были установлены на входе и выходе сплиттер-магнита (магнит Ламбертсона) для контроля пучка, проходящего по прямой траектории вне области поворотного поля.

На рисунке 4.1.10 показано рабочее окно системы контроля прохождения пучка через сплиттер-магнит. В левой части окна показаны «сырые» регистрируемые сигналы и их первичная обработка для компенсации спада вершины импульса. В правой части окна показаны обработанные сигналы с каждой пары электродов Р-ДПП «BPM-1», установленного на расстоянии ~1 м перед входом в магнит «4МС», и «BPM-2», установленного на расстоянии ~2 м после выхода из магнита «4МС». Зарегистрированные суммарные отклики Р-ДПП по горизонтальной оси равны ~ 520 мВ/мА, что согласуется с результатами моделирования и подтверждает правильность построенной модели. По центру окна показана координатная X/Y-плоскость с положениями центров тяжести пучка, рассчитанными на основе модельной величины DoS. В нижней части окна размещены результаты измерений тока пучка на Р-ДПП «BPM-2» и ИДТ, установленном рядом с ним, подтверждающие, что Р-ДПП воспроизводит форму, амплитуду и длительность тока аналогично ИДТ.

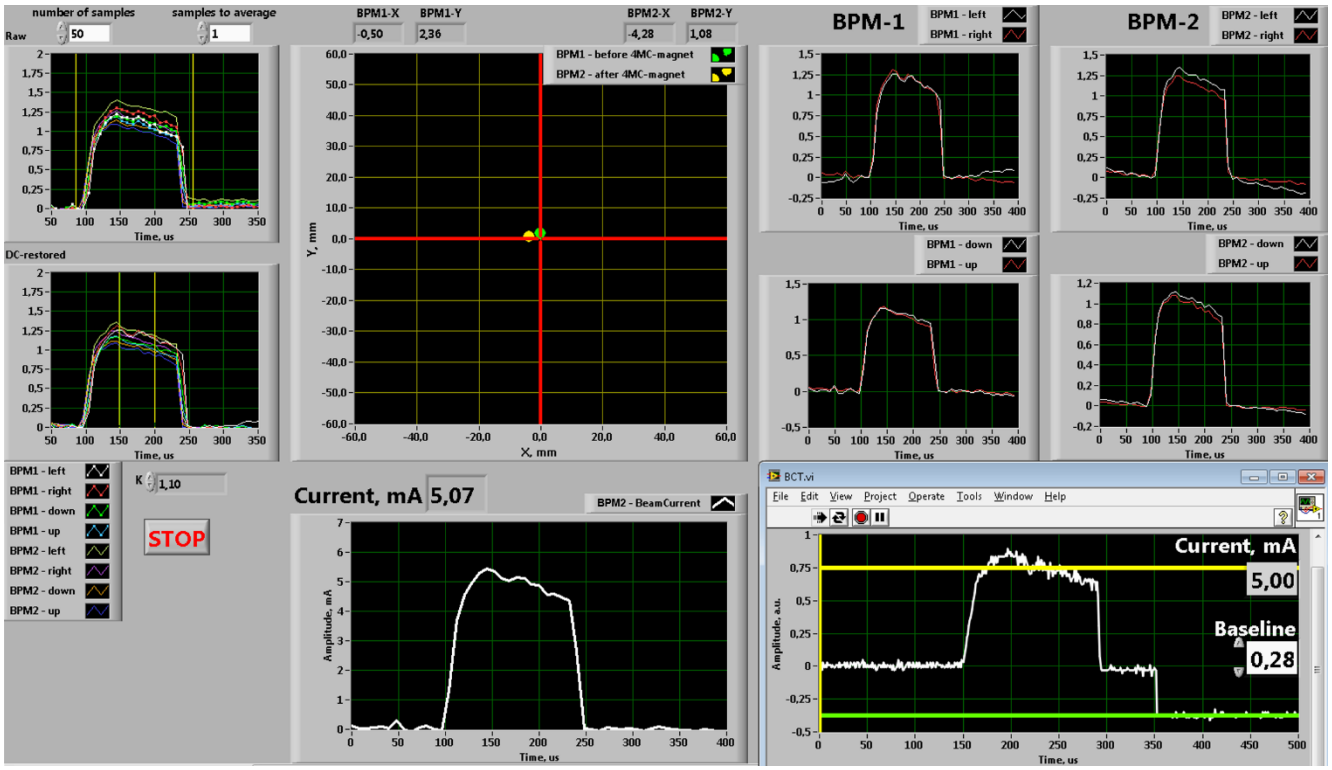


Рисунок 4.1.10 – Окно с результатами измерений положения, а также амплитуды и длительности тока пучка протонов энергией 267 МэВ, 5 мА, 150 мкс (по основанию), 50 Гц с помощью двух Р-ДПП и ИДТ

Итоговые эксплуатационные параметры разработанной системы Р-ДПП

Благодаря использованию усилителя заряда в качестве предусилительной электроники классических линейно-разрезных датчиков положения пучка (рисунок 4.1.11) и методике калибровки датчиков на основе численной физической модели разработанная система диагностики разгруппированных пучков протонов обладает следующими параметрами:

- возможность измерения положения разгруппированных пучков ионов;
- возможность измерений формы, амплитуды и длительности импульсов тока;
- пространственное разрешение: <130 мкм в апертуре 130 мм для тока 10 мА,
- диапазон измеряемой амплитуды импульсов тока: 0.05 ÷ 50 мА;
- диапазон измеряемой длительности импульса тока: 10 ÷ 200 мкс;
- спад вершины импульса: < 0.05 %/мкс.

Рисунок 4.1.11 – Фотография электродов линейно-разрезного ДПП ИЯИ РАН в сборе с охранными кольцами и защитным экраном

4.2 Неразрушающая система аварийного контроля потерь пучка на основе индукционных датчиков тока

Предложенная в Главе 1 концепция системы диагностики пучка для линейного ускорителя DARIA учитывает значительную импульсную (~1.3 МВт) и среднюю (~13 кВт) мощности пучка в совокупности с относительно низкой энергией (<13 МэВ) и рекомендует построение системы на основе устройств, использующих неразрушающие способы измерений ключевых параметров пучка, в частности, индукционные датчики тока. Однако вопрос контроля потерь пучка в подобном линейном ускорителе остается открытым, так как традиционные датчики потерь: фотодетекторы, сцинтилляторы или газовые счётчики при такой энергии протонного пучка имеют либо крайне низкую эффективность, либо в принципе не применимы.

При прохождении пучка от источника до выхода ускорителя неизбежно возникновение потерь пучка, и чем больше запасенная в пучке мощность, тем важнее осуществление непрерывного контроля тока пучка на разных участках машины, в том числе и в каналах транспортировки пучков низких и средних энергий. В сильноточных ускорителях ионов потери пучка могут приводить к термомеханическим повреждениям вплоть до сквозного прожига стенок элементов ускоряюще-фокусирующего канала в течение нескольких импульсов тока пучка.

В связи с этим, исходя из опыта автора в настройке параметров пучка сильноточного линейного ускорителя протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН, для использования в проекте DARIA предложена простая и эффективная система аварийного контроля потерь пучка на основе индукционных датчиков тока под условным названием «Δ ИДТ» [15].

Индукционные датчики тока

На основе результатов разработок, изложенных в Главе 2, для ЛУ проекта DARIA были изготовлены два индукционных датчика тока, фотография которых представлена на рисунке 4.2.1.

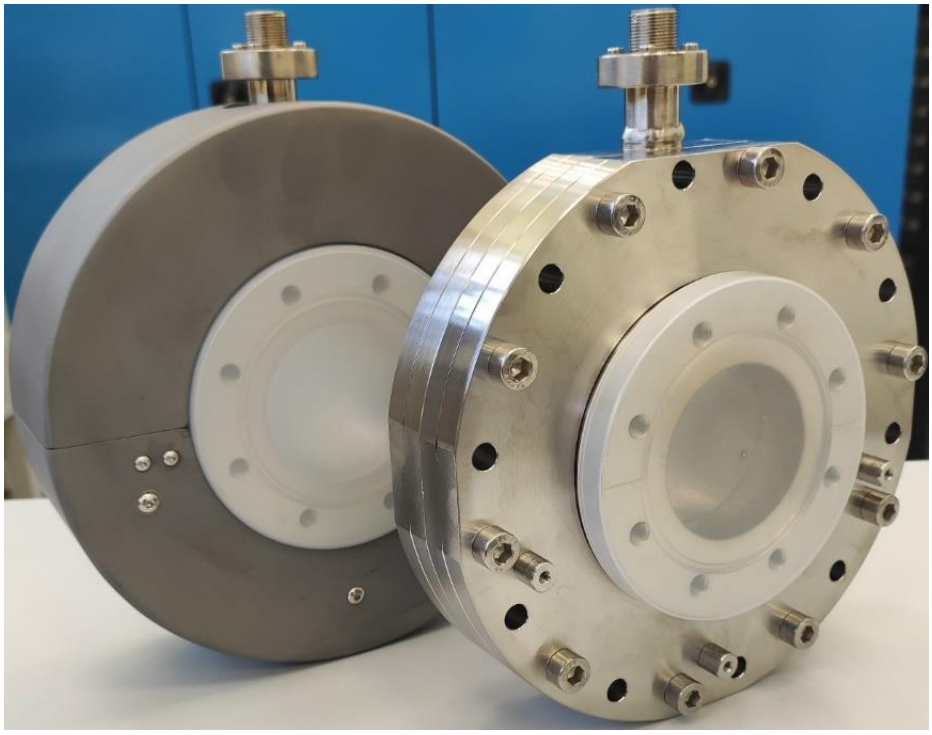


Рисунок 4.2.1 – Фотография двух ИДТ, изготовленных для ЛУ DARIA

В качестве сердечника выбрано кольцо без диэлектрического покрытия из MnZn-феррита с начальной магнитной проницаемостью ~7000 и индукцией насыщения ~400 мТл. Сигнальная обмотка, состоящая из 16 витков и одиночный калибровочный виток выполнены из медного провода в полиимидной изоляции, удовлетворяющей требованием радиационной стойкости и вакуумной чистоты. Для снижения уровня статических и низкочастотных магнитных полей от различных систем ЛУ, включая квадрупольные линзы, предусмотрено использование двух экранов из магнитной нержавеющей стали. Внутренний экран сердечника изготовлен в виде корпуса с осесимметричной кольцевой щелью. Внешний экран полностью закрывает весь вакуумный корпус датчика и оклеен изнутри фольгой из аморфного сплава кобальта и железа.

Для правильной обработки результатов измерений важное значение имеет не только амплитуда сигнала, но и форма временного отклика датчика на заданный импульс тока пучка. В связи с этим, обычно используют понятия времени нарастания фронта импульса и времени спада вершины импульса.

Разработанные ИДТ укомплектованы трансимпедансными предварительными усилителями (УПР) (Рисунок 4.2.2), благодаря которым фронт импульса не превышает 200 нс, а спад вершины составляет < 0.02 %/мкс. Схема усилителей содержит в себе источник калибровочного тока и каскад реле для переключения измеряемого диапазона тока пучка от 0.1 до 150 мА.

Рисунок 4.2.2 – Фотография изготовленного УПР ИДТ

Пример сигнала ИДТ, регистрируемого цифровой системой сбора и обработки данных, представлен на рис. 5.

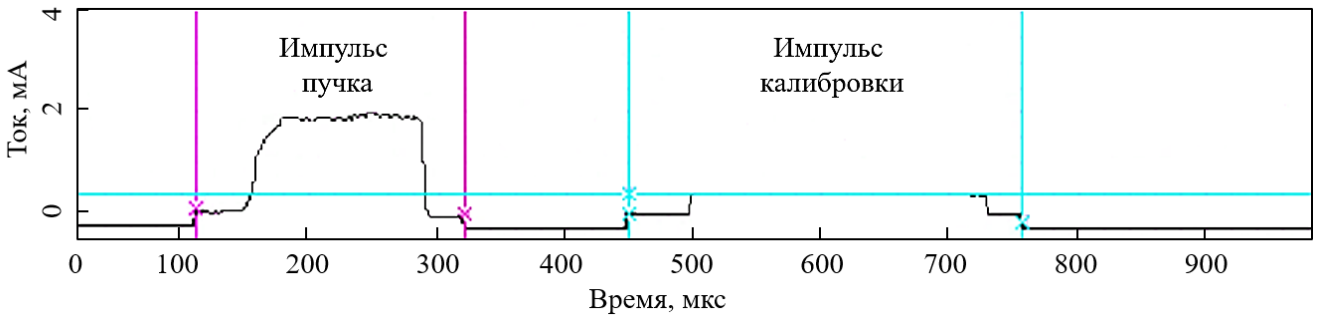


Рисунок 4.2.3 – Пример результата сбора и обработки сигнала ИДТ

Контроль разности токов

Контроль разности токов осуществляется так называемой ячейкой «Δ ИДТ» – аналоговой ячейкой быстрой аварийной защиты линейного ускорителя по разности токов, функциональная схема работы которой приведена на рисунке 4.2.4.

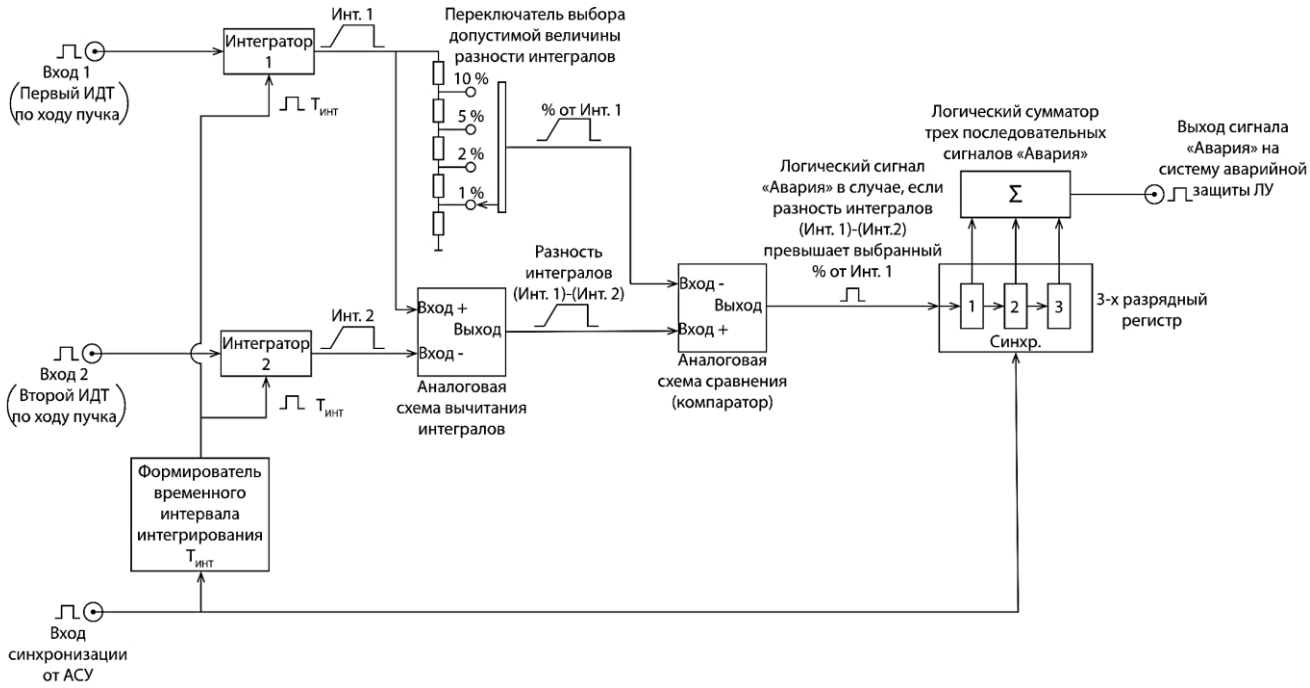


Рисунок 4.2.4 – Функциональная схема ячейки «Δ ИДТ»

На вход ячейки поступают два сигнала от предварительных усилителей: основной сигнал от первого по ходу пучка ИДТ-1 и сигнал, сравниваемый с основным, от второго по ходу пучка ИДТ-2, а также импульс синхронизации, соответствующий частоте следования импульсов тока пучка линейного ускорителя. Сигнал синхронизации запускает формирователь, который включает интеграторы на время длительности измеряемых импульсов тока пучка, в результате чего фактически сравниваются не амплитуды сигналов, а интегрированный заряд каждого импульса тока.

Следует отметить, что границы интервала интегрирования $T_{инт}$ должны быть выбраны максимально близко к фронтам импульса тока, для того чтобы минимизировать интегрирование паразитных фонов и наводок вне импульса.

К выходу интегратора Инт.1 подключен многоступенчатый переключаемый резистивный делитель напряжения с отводами в 1, 2, 5, 10 % от входного. С выходов интеграторов сигналы Инт.1 и Инт.2 поступают на аналоговую схему вычитания (Инт.1 – Инт.2), и результат вычитания сравнивается на компараторе с выбранной на делителе долей основного интеграла Инт.1. Если результат вычитания, т. е. эффективные импульсные потери заряда пучка, превышает выбранный предел, то на выходе схемы сравнения появляется логический сигнал «Авария».

Можно отметить, что время прохождения пучка между двумя датчиками никак не сказывается на работе схемы сравнения токов, потому что это время (с учетом времени прохождения сигналов до ячейки «Δ ИДТ» и времени полного срабатывания всей электронной схемы), как правило, значительно меньше периода следования импульсов тока пучка, который, в частности, для предельного проектного режима работы ускорителя DARIA составляет 10 мс, т. е. предложенная схема контроля может обрабатывать каждый импульс тока.

Однако критически важным фактором является равенство коэффициентов усиления исходного сигнала в предусилителях ИДТ (с учетом разной длины линий передачи данных от предусилителей до ячейки схемы сравнения). Поэтому при настройке системы в обязательном порядке вручную выравнивают величину итогового усиления (по значениям сигналов калибровочных токов ИДТ), после чего выбирают порог сравнения двух обрабатываемых сигналов (в процентах), который можно повысить в случае наводок и шумов, искажающих форму импульса, либо, наоборот, уменьшить, если наводки подавлены и не влияют на процедуру сравнения регистрируемых импульсов тока.

При работе сильноточных ускорителей необходимо учитывать, что даже одиночный сфокусированный импульс тока пучка, особенно в случае пучков с относительно низкой энергией ~5–50 МэВ, может вызвать разрушение целостности каких-либо элементов ускорительного тракта, в том числе и вакуумной стенки ионопровода, если воздействие оказывается точечным. При попадании такого пучка на стенку по касательной также могут происходить нагрев и последующая

механическая деформация. Кроме того, в случае возникновения потерь пучка в объеме высокочастотного ускоряющего резонатора, может снижаться его электрическая прочность с потенциальным развитием мультипакторного разряда и возникновением электрических пробоев. Отдельно следует учесть, что при энергиях протонов свыше ~10 МэВ потери пучка приводят к паразитной непредусмотренной активации элементов ускорительного тракта.

Так как схема сравнения токов обрабатывает каждый импульс, то она может быть настроена для выдачи аварийного сигнала по одиночному событию, однако такая работа схемы может быть нестабильной в условиях большого числа различных помех и наводок от мощных подсистем ускорителя (источники высокочастотного питания, вакуумные и водяные насосы, импульсные элементы магнитооптики канала). Поэтому для предотвращения ложных срабатываний от возможных помех на линиях входных сигналов от ИДТ-1 и ИДТ-2 был реализован принцип последовательного трехкратного срабатывания схемы для формирования итогового сигнала запрета. Сигнал «Авария» с выхода компаратора поступает на вход трехразрядного логического регистра. Если аварийные сигналы возникают последовательно один за другим не менее трех раз с частотой следования импульсов тока пучка, то на выходе регистра вырабатывается суммарный импульсный сигнал «Авария», который передается в систему аварийной защиты линейного ускорителя для последующей блокировки пучка. Схема работает при любой частоте следования импульсов тока. По желанию пользователей для каждого конкретного случая может быть организован произвольный индивидуальный алгоритм генерации сигнала запрета.

Ячейка «Δ ИДТ» расположена вместе с управляющими платами предварительных усилителей в едином «Блоке контроля разницы токов», фотография которого показана на Рисунке 4.2.5.

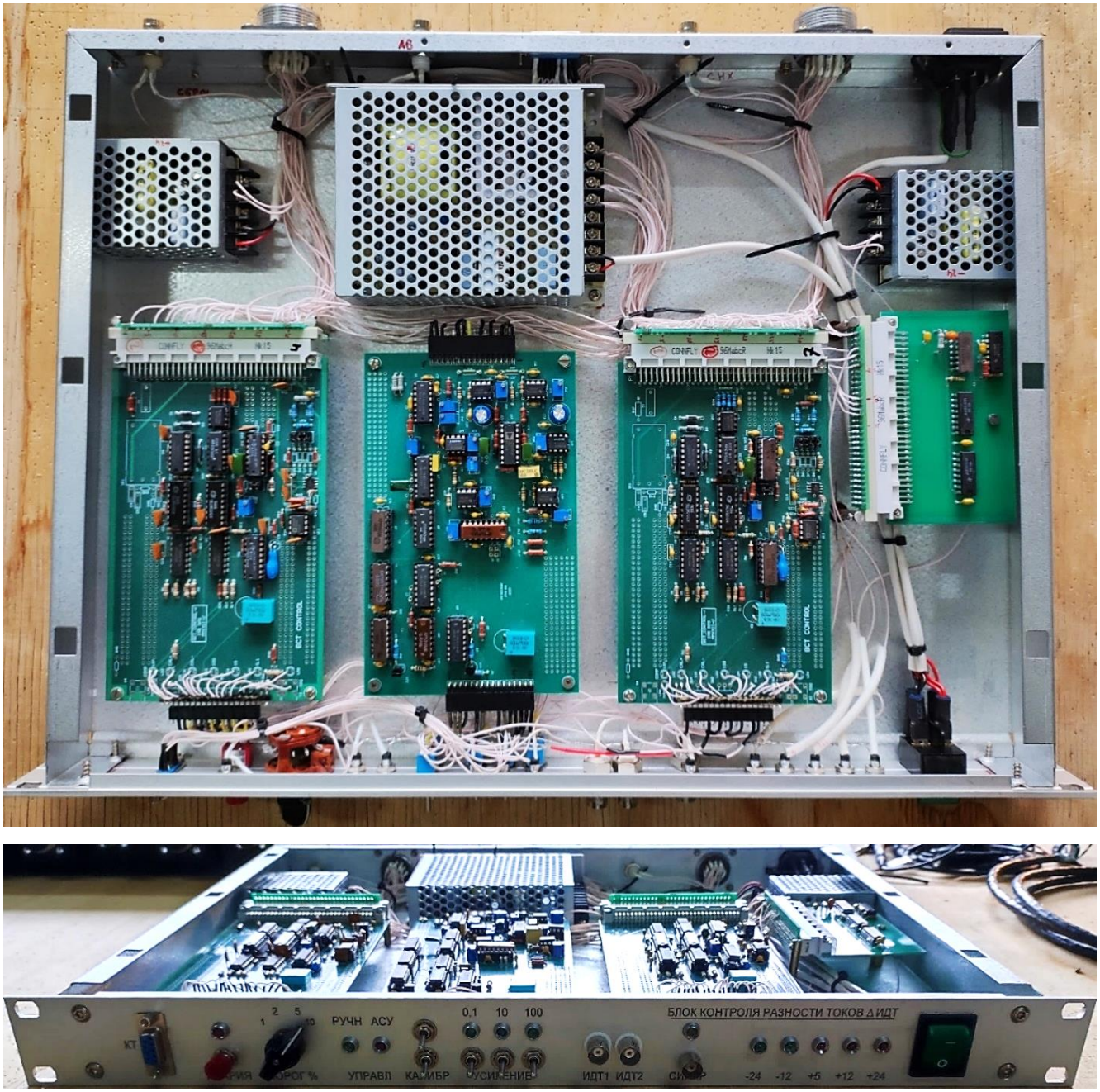


Рисунок 4.2.5 – Блок контроля разницы токов с установленной платой ячейки «Δ ИДТ» (в центре) и управляющими платами УПР (по бокам)

Блок выполнен в виде 1U крейта 19” формата для возможности установки в стандартную телекоммуникационную стойку и помимо функциональных плат содержит встроенные источники питания, формирующие необходимые напряжения +5 В, ±12 В, ±24 В из входного сетевого напряжения питания 220 В, 50 Гц.

На передней панели блока размещены необходимые разъемы, тумблеры и индикаторные светодиоды для полностью ручного автономного управления системой, осуществления контроля за её состоянием во время работы, а также проведения наладочных процедур.

Для проведения совокупных имитирующих испытаний всех разработанных устройств, объединенных в систему диагностики, был собран стенд (Рисунок 4.2.6), и показано, что блок регистрирует тестовые импульсы тока амплитудой 2.5 мА и длительностью 10 мкс, подаваемые по проволоке сквозь ИДТ, и вырабатывает номинальный аварийный логический сигнал при превышении установленного порога разницы интегралов токов поданных тестовых импульсов 1, 2, 5, 10 %.

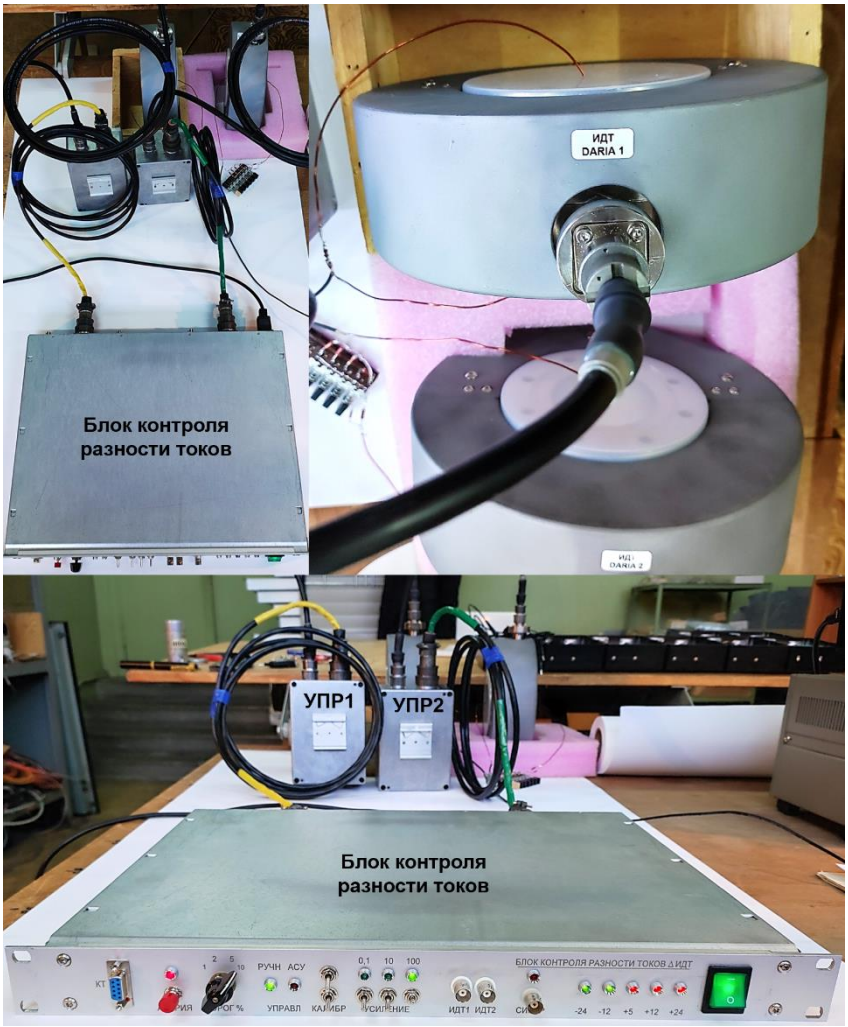


Рисунок 4.2.6 – Фотографии изготовленных ИДТ, УПР и блока контроля разности токов, объединенных в систему для проведения лабораторных испытаний

Итоговые эксплуатационные параметры разработанной системы «Δ ИДТ»

Исходя из результатов проектирования и проведенных лабораторных испытаний разработанная система аварийного контроля потерь пучка «Δ ИДТ» на основе индукционных датчиков тока обладает следующими параметрами:

- дискретный контроль разницы токов пучка: 1, 2, 5, 10 %;
- диапазон измеряемой амплитуды импульсов тока: 0.1 ÷ 150 мА;
- диапазон измеряемой длительности импульса тока: 1 ÷ 200 мкс;
- минимальная длительность фронта импульса: 0.25 мкс;
- спад вершины импульса: < 0.02 % / мкс;
- четыре переключаемых диапазона коэффициента усиления: 0.1, 1, 10, 100.

Пример представленной системы «Δ ИДТ» успешно используется на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН в качестве одной из основных быстрых аварийных блокировок благодаря тому, что формируемый аварийный импульс передается на чоппер – устройство прореживания и блокировки импульсов тока пучка на входе в ускоритель. В частности, подобные пары индукционных датчиков были разработаны и установлены автором на выходе пучка из линейного ускорителя и входах пучков в нейтронные источники для контроля интегральных потерь пучка в упомянутых ранее протяженных каналах транспортировки исследовательского ускорительного центра ИЯИ РАН.

4.3 Выводы Главы 4

В Главе 4 описаны некоторые оригинальные системы и методы диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, связанные с опытом автора в проводке высокоинтенсивных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки исследовательского ускорительного центра ИЯИ РАН. Представленные результаты могут быть использованы при разработке и создании систем диагностики для других сильноточных линейных ускорителей ионов различного назначения, в том числе для создания компактных нейтронных источников.

В частности, предложен, разработан и реализован метод неразрушающей диагностики положения разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения пучка. Показано, что классические ёмкостные электростатические датчики с линейным разрезом могут служить в качестве многоцелевых средств диагностики разгруппированных пучков протонов, обеспечивая неразрушающие измерения положения и тока в широком диапазоне интенсивностей пучка.

Исследования, проведенные для пучка протонов в ИЯИ РАН, показывают, что при типичных параметрах пучка такие датчики позволяют измерять положение центра масс пучка с разрешением ~0.1 мм, что соответствует примерно 0.1% их апертуры. Так как отношение сигнал/шум ограничено общей ёмкостью детектора, необходимо использовать предварительный усилитель заряда, подключенный к датчику коротким кабелем. При этом калибровка датчика может быть выполнена с помощью кабеля произвольной длины, так как выходной сигнал такого усилителя не зависит от общей ёмкости детектора.

Возможность измерений тока пучка подтверждается и количественно описывается с помощью трехмерного моделирования. Разрешающая способность измерений тока определяется шумами электроники и составляет ~50 мкА. Относительная погрешность измерений тока составляет менее 3% и определяется в основном нелинейностями измеряемого сигнала из-за положения и размера пучка.

Для линейного ускорителя проекта DARIA предложена, разработана и изготовлена так называемая система «Δ ИДТ» для контроля разности измеряемых токов пучка при прохождении двух последовательно установленных индукционных датчиков тока, которая может быть использована для контроля потерь пучка с целью быстрой аварийной защиты сильноточного ускорителя.

Индукционные датчики традиционно обеспечивают эффективную диагностику амплитуды и длительности тока пучка в ускорителях. Однако использование дополнительной предусилительной и обрабатывающей электроники позволяет расширить их функциональные возможности. В частности, контроль разности токов реализован на основе сравнения интегрального заряда каждого импульса тока пучка, что повышает точность измерений в случае работы с импульсами тока сложной формы. Пользователю системы предоставлено на выбор несколько дискретных значений измеряемой разницы сигналов ИДТ: от 1% для номинального режима работы до 10% в случае перестройки рабочего режима ускорителя и проведения настроечных процедур. Для предотвращения ложных срабатываний системы от различных помех формирование итогового аварийного сигнала происходит после трех последовательных срабатываний схемы сравнения на частоте следования анализируемых импульсов тока пучка.

Пример представленной системы «Δ ИДТ» успешно используется на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН в качестве одной из основных быстрых аварийных блокировок. В частности, подобные пары индукционных датчиков были разработаны и установлены автором на выходе пучка из линейного ускорителя и входах пучков в нейтронные источники для контроля интегральных потерь пучка в протяженных каналах транспортировки исследовательского ускорительного центра ИЯИ РАН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы

В диссертации изложены результаты работ по созданию приборно-методической базы систем диагностики пучков для действующих, сооружаемых и проектируемых отечественных и зарубежных линейных резонансных ускорителей ионов и стендов облучения на их основе:

1. На основе детального анализа многочисленных взаимосвязанных физических процессов разработана физико-техническая концепция построения систем базовой диагностики пучков для линейных резонансных ускорителей ионов.

2. На основе разработанной общей физико-технической концепции создана концепция системы диагностики, а также разработана и изготовлена неразрушающая система быстрого аварийного контроля потерь пучка сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA.

3. Разработан и экспериментально верифицирован для проведения вычислительных физических экспериментов комплекс трехмерных мультифизичных моделей оборудования диагностики пучков для линейных ускорителей ионов.

4. Разработаны, изготовлены и настроены различные системы и приборы базовой диагностики пучков для линейных ускорителей ионов отечественных и зарубежных ускорительных комплексов. Из всего многообразия существующих устройств диагностики параметров пучка для разработки были выбраны приборы, практическая реализация которых возможна с учетом имеющегося или гарантированно достижимого уровня отечественных технологий, а именно:

   Измерители тока пучка:

   - индукционные датчики тока на основе ферритовых сердечников,
   - охлаждаемые и неохлаждаемые цилиндры Фарадея.

Измерители поперечного профиля пучка:

- двухпроволочные сканеры и многопроволочные профилометры,
- ионизационные мониторы поперечного сечения,
- флуоресцентные мониторы.

Измерители поперечного эмиттанса пучка:

- диафрагмированные и щелевые измерители.

Измерители положения и фазы:

- короткозамкнутые полосковые датчики положения.

Измерители продольной микроструктуры пучка:

- измеритель формы сгустков (фазовый анализатор).

5. Разработана и реализована комплексная система диагностики пучка ионов водорода смешанных зарядностей, включая атомарные пучки, на основе многоламельных профилометров и цилиндров Фарадея с контрольными датчиками ореола для использования на исследовательских стендах.

6. Разработана и реализована комплексная система диагностики пучков протонов, выведенных на воздух, на основе люминесцентных экранов и многоанодных газовых счетчиков для стендов протонного облучения и протонной терапии.

7. Предложена и реализована методика разработки короткозамкнутых полосковых датчиков положения пучка, объединяющая этапы трехмерного численного моделирования, оптимизации конструкции, изготовления опытного образца и калибровки в стендовых испытаниях.

8. Предложен и реализован метод неразрушающей диагностики положения и тока разгруппированных пучков протонов на основе электростатических ёмкостных линейно-разрезных датчиков положения пучка с использованием предварительных усилителей заряда для диагностики пучков в протяженных каналах транспортировки крупных ускорительных комплексов.

9. Для измерителей продольной формы сгустков, работающих на основе поперечной высокочастотной модуляции вторичных низкоэнергетических электронов, разработан и реализован метод повышения фазового разрешения измерений до уровня, ограниченного дисперсией времени вылета электронов вторичной эмиссии, а также реализован метод расширения рабочего фазового диапазона измерений до полного периода следования анализируемых сгустков.

10. По итогам проведенных исследований представлена совокупность результатов экспериментальных измерений, настройки и оптимизации параметров пучков на отечественных и зарубежных линейных ускорителях ионов, каналах транспортировки и исследовательских стендах.

Основные результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы при проектировании линейных резонансных ускорителей ионов различного предназначения для выбора состава и структуры систем диагностики пучков, так как разработанные автором оригинальные конфигурации оборудования диагностики предназначены для широкого круга ускорителей и в совокупности фактически перекрывают весь диапазон параметров пучков в существующих и проектируемых линейных ускорителях ионов по типу частиц (от протонов и отрицательных ионов водорода до многозарядных тяжелых ионов), энергиям (от низкоэнергетических каналов транспортировки с энергиями пучка десятки кэВ до высокоэнергетичных участков на выходе современных ускорителей с энергиями ~ 1 ГэВ) и интенсивности, позволяя проводить необходимые измерения и на сильноточных пучках для нейтронных источников, комплексов для наработки медицинских изотопов или протонной флэш-терапии, и на пучках низкой интенсивности, например, для конвенциональной протонной терапии или стендов облучения для исследований радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры, включая пучки смешанных зарядностей и пучки, выведенные на воздух.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своему учителю А. В. Фещенко за научно-технические консультации и многолетнюю всестороннюю поддержку.

Большинство работ в рамках диссертации были выполнены в соавторстве с коллегами из ИЯИ РАН: В. А. Гайдашом и А. И. Титовым, которым автор искренне благодарен, поскольку без их работ в области электроники и программного обеспечения достижение заявленных целей диссертации было бы невозможно. Кроме того, автор считает своей приятной обязанностью поблагодарить: Д. А. Чермошенцева, А. А. Мельникова, В. Е. Амосову и И. И. Полоника, чьим научным руководителем в МФТИ он являлся в течение разных лет, за плодотворное сотрудничество, результаты которого частично отражены в тексте диссертации.

Автор благодарит В. В. Парамонова не только за регулярные научные консультации в ходе проведенных исследований, но и за инициирование и поддержку работ по подготовке и оформлению диссертации.

Отдельно автор благодарит Л. В. Кравчука за многолетнюю поддержку и огромные усилия, направленные на распространение и внедрение достигнутых результатов работы, а также выражает благодарность коллегам из отечественных и зарубежных ускорительных центров за их решение использовать разработанные системы, приборы и методы диагностики пучков в своих организациях и помощь в практической реализации этих задач: Н. В. Завьялова, А. М. Опекунова и П. Н. Цедрика из ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, Т. В. Кулевого из НИЦ «Курчатовский институт», С. М. Полозова из НИЯУ МИФИ, А. В. Бутенко из ОИЯИ, P. Forck и T. Sieber из FAIR-GSI (Германия), U. Raich и J. Tan из CERN (Швейцария), I. Dolenc Kittelmann и V. Grishin из ESS (Швеция), F. Doucet и A. Tanquintic из MYRRHA (Бельгия), S. Lidia из FRIB MSU (США).

Также автор благодарит всех сотрудников Отдела ускорительного комплекса ИЯИ РАН за полезные обсуждения и техническую поддержку в ходе всего многолетнего цикла выполнения представленных работ.

Искреннюю благодарность автор выражает своей супруге Н. С. Гавриловой за понимание, поддержку, терпение и свободное время для подготовки диссертации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЦП	аналого-цифровой преобразователь
ВЭЭ	вторичная электронная эмиссия
ДПП	датчик положения пучка
ВЧ	высокочастотный
ИМПС	ионизационный монитор поперечного сечения
ИДТ	индукционный датчик тока
ИФС	измеритель формы сгустков
КПТ	комплекс протонной терапии
линак	линейный ускоритель (LINAC: LINear ACcelerator)
ЛУ	линейный ускоритель
ЛЭ	люминесцентный экран
МГС	мультианодный газовый счетчик
МКП	микроканальная пластина
МЛП	многоламельный профилометр
МПП	многопроволочный профилометр
МШУ	малошумящий усилитель
ПЗС	прибор с зарядовой связью
ПЛИС	программируемая логическая интегральная схема
ПО	программное обеспечение
ПС	проволочный сканер
Р-ДПП	разрезной датчик положения пучка
СДП	система диагностики пучка
СПО	стенд протонного облучения
ФЛУМ	флуоресцентный монитор
ЦФ	цилиндр Фарадея
ЭОП	электронно-оптический преобразователь
DoS	difference over sum
LEBT	low energy beam transport
MEBT	medium energy beam transport
RFQ	radio-frequency quadrupole

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gavrilov S.**, Feschenko A., Reinhardt-Nickoulin P., Vasilyev I. Two-dimensional non-destructive diagnostics for accelerators by Beam Cross section Monitor // Journal of instrumentation, 2014 JINST 9 P01011, 2014. DOI: 10.1088/1748-0221/9/01/P01011
2. **Gavrilov S.**, Reinhardt-Nickoulin P., Vasilyev I. Electrostatic pick-ups for debunched beams // Journal of instrumentation, 2014 JINST 9 T1007, 2014. DOI: 10.1088/1748-0221/9/10/T10007
3. **Gavrilov S.**, Feschenko A., Chermoshentsev D. Bunch Shape Monitors for modern ion linacs // Journal of instrumentation, 2017 JINST 12 P12014, 2017. DOI: 10.1088/1748-0221/12/12/P12014
4. Belov A. S., Chermoshentsev D. A., **Gavrilov S. A.**, Frolov O. T., Nechaeva L. P., Nikulin E. S. and Zubets V. N. High responsivity secondary ion energy analyzer // Journal of instrumentation, 2018 JINST 13 T05001, 2018. (Автору принадлежат результаты разработки и анализа численной физической модели детектора). DOI: 10.1088/1748-0221/13/05/T05001
5. **Gavrilov S. A.**, Latysheva L. N., Lebedev S. G., Sobolevsky N. M. and Feschenko A. V. Stand for studying the effect of proton irradiation on integrated circuits: estimation of particle fluxes, activation and dose rate // Journal of surface investigation: x-ray, synchrotron and neutron techniques, Vol. 12, № 5, pp. 1041–1046, 2018. DOI: 10.1134/S1027451018050257
6. Belov A. S., Chermoshentsev D. A., **Gavrilov S. A.**, Frolov O. T., Nechaeva L. P., Nikulin E. S. and Zubets V. N. A secondary ion energy analyzer for measuring the degree of compensation of the ion beam space charge // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 62, № 5, pp. 609–614, 2019. (Автору принадлежат результаты разработки и анализа численной физической модели детектора). DOI: 10.1134/S002044121905004X

7. Melnikov A., **Gavrilov S.** Operation experience of ionization-proportional chamber for low-current beam measurements at INR RAS proton linac // Journal of instrumentation, 2020 JINST 15 P09005, 2020.
DOI: 10.1088/1748-0221/15/09/P09005
8. Titov A. I., Bragin S. E., Volodkevich O. M., **Gavrilov S. A.** Beam transverse phase space tomography at the high-intensity linear accelerator of hydrogen ions // Instruments and Experimental Technuqiues, Vol. 66, № 1, pp. 1–18, 2023. (Автору принадлежат результаты разработки и настройки оборудования диагностики пучков, использованного в проведенных исследованиях.)
DOI: 10.1134/S0020441222060185
9. **Gavrilov S. A.**, Titov A. I. A concept of a beam instrumentation system for the high-intensity DARIA proton linac // Journal of surface investigation: x-ray, synchrotron and neutron techniques, Vol. 17, № 4, pp. 782–791, 2023.
DOI: 10.1134/S1027451023040055
10. **Гаврилов С.А.**, Калинин Ю.Ж., Титов А.И. Широкоапертурный цилиндр Фарадея для высокоинтенсивного линейного ускорителя протонов проекта DARIA // Сибирский физический журнал, Т. 18, №4, с. 55 – 61, 2023.
DOI: 10.25205/2541-9447-2023-18-4-54-61
11. Kulevoy T.V., Kopachev G.N., Sitnikov A.L., Semennikov A.I., Skachkov Vl. S., Kilmetova I. V., Kuibeda R. P., Kozlov A. V., Khabibullina E. R., Malishev A. A., Andreev S. N., Grebeshkov A. O., Grigoriev S. V., Kovalenko N. A., Bulavin M. V., Mukhin K. A., Moskvin E. V., Pavlov K. A., Grigoryeva N. A., Skalyga V. A., Izotov I. V., Goikhman A. Yu., Kravtsov E. A. and **Gavrilov S. A.** The DARIA compact neutron source project // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, Suppl. 1, pp. S16–S26, 2024. (Автору принадлежит раздел 2.3.4 «Beam diagnostics», описывающий концепцию и отдельные устройства системы диагностики пучка.)
DOI: 10.1134/S0020441224701239
12. Titov A. I., **Gavrilov S. A.**, Polonik I. I. Multipurpose software for acquisition and processing of optical signals from beam profile monitors at the INR linac

// Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, Suppl. 1, pp. S70–S76, 2024. (Автору принадлежат результаты разработки и настройки оборудования диагностики пучков, использованного в проведенных исследованиях.) DOI: 10.1134/S0020441224701343

13. **Gavrilov S. A.**, Gaidash V. A., Titov A. I. Beam diagnostics for the irradiation facility at the hydrogen ion linac of the Institute for Nuclear Research // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, Suppl. 2, pp. S161–S166, 2024. DOI: 10.1134/S0020441224701744
14. **Gavrilov S. A.**, Kalinin Yu. G., Polonik I. I., Titov A. I. A beam-induced fluorescence monitor at the low-energy beam transport line of the proton linac at the Institute for Nuclear Research // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, Suppl. 2, pp. S167–S173, 2024. DOI: 10.1134/S0020441224701756
15. **Gavrilov S. A.**, Gaidash V. A., Titov A. I. An emergency beam loss monitoring system based on beam current transformers for the linear accelerator of the DARIA project // Journal of surface investigation: x-ray, synchrotron and neutron techniques, Vol. 18, № 6, pp. 1623–1628, 2024. DOI: 10.1134/S1027451024701623
16. Amosova V., **Gavrilov S.** Features of simulation, design and development of stripline beam position monitors for ion linear accelerators // Journal of instrumentation, 2025 JINST 15 P09005, 2025. DOI: 10.1088/1748-0221/20/06/P06028
17. **Gavrilov S.**, Reinhardt-Nickoulin P., Vasilyev I. Electrostatic pick-ups for debunched beams at INR linac // Proceedings of RuPAC14, pp. 420–422, 2014.
18. **Gavrilov S.**, Feschenko A., Reinhardt-Nickoulin P. INR RAS instrumentation for bunch shape and beam cross-section monitoring // Proceedings of RuPAC16, pp. 204–206, 2016.
19. **Gavrilov S.**, Gaydash V., Gorbunov V., Kalinin Y., Kiselev Y., Reinhardt-Nickoulin P., Vasilyev I. Beam diagnostics and instrumentation upgrade for multipurpose research complex of INR RAS // Proceedings of RuPAC16, pp. 667–669, 2016.

20. Aseev V., Bragin S., **Gavrilov S.**, Reinhardt-Nickoulin P., Volodkevich O. Beam simulation and measurements at beam line to RADEX experimental area of INR linac // Proceedings of RuPAC16, pp. 250–252, 2016.
21. Chermoshentsev D., Feschenko A., **Gavrilov S.** Electrodynamic characteristics of RF-deflector for bunch shape monitor // Proceedings of RuPAC16, pp. 659–661, 2016.
22. Churaev M., **Gavrilov S.** Thermal loads of wire-based beam instrumentation at ion linacs // Proceedings of RuPAC16, pp. 670–672, 2016.
23. Feschenko A., **Gavrilov S.** Methods for bunch shape monitor phase resolution improvement // Proceedings of LINAC16, pp. 408–410, 2016.
24. **Gavrilov S.**, Feschenko A. Design and development of Bunch shape monitor for FRIB MSU // Proceedings of IBIC17, pp. 179–181, 2017.
25. **Gavrilov S.**, Feschenko A. Bunch shape monitors for modern ion linacs // Proceedings of IBIC17, pp. 176–178, 2017.
26. **Gavrilov S.**, Reinhardt-Nickoulin P., Titov A. 2D non-destructive transverse diagnostics by Beam cross-section monitor // Proceedings of IBIC17, pp. 393–395, 2017.
27. Sieber T., Forck P., Barth W., Dziuba F., Feschenko A., **Gavrilov S.**, Heilmann M., Kürzeder T., Miski-Oglu M., Reeg H., Reiter A., Yaramyshev S. Bunch shape measurements at the GSI cw-linac prototype // Proceedings of IPAC18, pp. 2091–2094, 2018.
28. **Gavrilov S.**, Melnikov A., Titov A. Beam diagnostics and instrumentation for proton irradiation facility at INR RAS linac // Proceedings of IBIC18, pp. 40–42, 2018.
29. **Gavrilov S.**, Feschenko A., Chermoshentsev D. Design, fabrication and laboratory tests of Bunch Shape Monitors for ESS linac // Proceedings of IBIC18, pp. 407–409, 2018.
30. Tan J., Bellodi G., Feschenko A., **Gavrilov S.** Results from the CERN LINAC4 longitudinal bunch shape monitor // Proceedings of IBIC18, pp. 415–419, 2018.
31. **Gavrilov S.**, Bragin S., Feschenko A., Gaidash V., Grekhov O., Kalinin Y., Kiselev Y., Lebedev S., Melnikov A., Serov V., Titov A., Volodkevich O., Arbuznikov D., Podgornaya O., Prokhorov E., Razinkov S., Tsedrik P., Tsibryaev S. Proton irradiation facility at INR RAS linac // Proceedings of RuPAC18, pp. 142–144, 2018.

32. Melnikov A., **Gavrilov S.** Multianode gas counter for low intensity beam diagnostics at the INR linac // Proceedings of RuPAC18, pp. 492–494, 2018.
33. Titov A., **Gavrilov S.** Luminescent diagnostics of low intensity proton beams at INR RAS linac // Proceedings of RuPAC18, pp. 489–491, 2018.
34. Chermoshentsev D., Feschenko A., **Gavrilov S.** Influence of mechanical vibrations on the phase resolution of bunch shape monitor // Proceedings of RuPAC18, pp. 477–479, 2018.
35. Bragin S., Feschenko A., **Gavrilov S.**, Grekhov O., Kalinin Y., Kiselev Y., Latysheva L., Lebedev S. G., Melnikov A., Serov V., Sobolevskiy N., Titov A., Volodkevich O., Arbuznikov D., Podgornaya O., Prokhorov E., Razinkov S., Tsedrik P. and Tsibryaev S. Development of Proton Irradiation Facility at the INR Linac // Journal of Physics: Conference Series,1238 012066, 2019.
36. Melnikov A., **Gavrilov S.** Modernization and operation of ionization-proportional gas counter at INR RAS proton linac // Proceedings of IBIC20, pp. 103–106, 2020.
37. Titov A., **Gavrilov S.** Transverse phase portrait tomography of proton beams at INR RAS linac // Proceedings of IBIC20, pp. 193–196, 2020.
38. **Gavrilov S. A.**, Feschenko A. V., Gaidash V. A. Development and implementation of bunch shape instrumentation for ion linacs // Proceedings of RuPAC21, pp. 1–6, 2021.
39. Belov A.S., Frolov O.T., **Gavrilov S.A.**, Nechaeva L.P., Turbabin A.V., Zubets V.N. Study of space charge compensation process of a 400 KeV pulsed hydrogen ion beam // Proceedings of RuPAC21, pp. 313–315, 2021.
40. Titov A. I., **Gavrilov S. A.**, Bragin S. E., Volodkevich O. M. Enhancement of transverse beam phase space analysis by tomography method at INR linac // Proceedings of RuPAC21, pp. 433–435, 2021.
41. **Gavrilov S. A.**, Polonik I. I., Titov A. I. Features of non-destructive beam instrumentation at the INR RAS high-intensity hydrogen ions linac // Proceedings of IBIC24, pp. 215–218, 2024.

42. Strehl P. Beam instrumentation and diagnostics / – Berlin: Springer, 2006.
43. Москалев В., Сергеев Г. Измерение параметров пучков заряженных частиц / – Москва: Энергоатомиздат, 1991.
44. Смалюк В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях / – Новосибирск: Параллель, 2009.
45. Forck P. Lecture notes on beam instrumentation and diagnostics / – JUAS, 2017. https://www-bd.gsi.de/conf/juas/juas_script.pdf
46. CERN Accelerator Schools 2008, 2013, 2018. https://cas.web.cern.ch/previous-schools
47. U.S. Particle Accelerator schools. https://uspas.fnal.gov/materials/materials-table.shtml
48. Arima H. Beam instrumentation and diagnostics. FFA'18 School. http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/beam_physics_lab/ffag18/school.html
49. Joint Accelerator Conferences Website. https://www.jacow.org
50. ARIES workshops. Experiences during hadron linac commissioning, 2021. https://agenda.ciemat.es/event/1229
51. NICA conceptual design report. http://nica.jinr.ru
52. The European Spallation Source Design. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1402-4896/aa9bff/pdf
53. The PIP-II Conceptual Design Report. https://inspirehep.net/literature/1516858
54. Bayle H. Effective shielding to measure beam current from an ion source // Review of scientific instruments, 85, 02A713, 2014.
55. Raich U. Beam diagnostics at CERN's LINAC-4 // Proceedings of ESS workshop, 2012.
56. Blokland W. Beam current monitors // Proceedings of USPAS, 2009.
57. Haque A. Proton-induced secondary electron emission from elemental solids over the energy domain 1 keV–1000 MeV // Results in Physics, 15, 102519, 2019
58. Sosa A. et al. Optimization of a short faraday cup for low-energy ions using numerical simulations // Proceedings of IBIC2014, 2014.

59. Conradie L. Beam diagnostics // ICTP-IAEA Workshop on accelerator technologies, 2019.
60. Bem P. et al. High-power TR-24 cyclotron-based p-n convertor cooled by submerged orifice jet // EPJ Web of Conferences 231, 03005, 2020.
61. Pulliam E. N. Thermal analysis of the LANSCE H+ RFQ test stand faraday cup // Proceedings of NAPAC2019, 2019.
62. Roncarolo F. et al. Overview of the CERN LINAC4 beam instrumentation // Proceedings of LINAC2010, 2010.
63. Harryman D. M., Wilcox C. C. An upgraded scanning wire beam profile monitoring system for the ISIS high energy drift space // Proceedings of IBIC2017, 2017.
64. Aleksandrov A. Large dynamic range beam profile measurements at SNS: challenges and achievements // Proceedings of PAC2011, 2011.
65. Rodriguez S. et al. Design of a profile monitor with 12 inches of actuator for FRIB // Proceedings of IBIC2014, 2014.
66. Wie J. FRIB Project Status and Beam Instrumentation Challenges // Proceedings of IBIC’17, 2017.
67. Cheymol B. Development of beam transverse profile and emittance monitors for the CERN LINAC4. Ph.D. Thesis / University Clermont-Ferrand II – Blaise Pascal, 2011.
68. Walasek-Höhne B. Scintillating screen applications in beam diagnostics // Proceedings of DIPAC2011, 2011.
69. Koziol H. Beam diagnostics for accelerators // CERN Accelerator School: Basic Course on General Accelerator Physics, 2005.
70. Krishnakumar R. Scintillation screen materials for beam profile measurements of high energy ion beams. Ph.D. Thesis / TU Darmstadt, 2016.
71. Титов А. И. Развитие аппаратно-программных средств управления и диагностики пучка для ускорительного комплекса ИЯИ РАН. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н.: 1.3.2 / –М.: ИЯИ РАН, 2025.

72. Budker G. I. et al. Experiments on producing intensive proton beams by means of the method of charge-exchange injection // Soviet atomic energy, v. 22-23, p. 441, 1967.
73. Teterev Yu. et al. Ionization Beam Profile Monitor for Operation Under Hard Environmental Conditions // Nucl. Physics and Atomic Energy, v. 12 (1), p. 98, 2011.
74. Poggi M. et al. Two-dimensional ionization beam profile measurement // Proceedings of DIPAC2009, 2009.
75. Михайлов В. Г. и др. Многопараметрические ионизационные датчики для контроля пучков ускоренных частиц // Приборы и техника эксперимента, № 6, стр. 39-53, 1995.
76. Ioudin L. et al. Synchrotron radiation parameters registration using beam cross-section image detector: the first experiments // Nuclear instruments and methods in physics research A, v. 405, p. 265-268, 1998.
77. Гаврилов С. А. Исследование метода двумерной неразрушающей диагностики поперечных характеристик пучков ускоренных заряженных частиц на основе ионизации остаточного газа. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н.: 01.04.01 / –М.: ИЯИ РАН, 2013.
78. Becker F. et al. BIF Monitors for FAIR // Proceedings of IPAC2012, 2012.
79. Hampf R. et al. Light emission processes in the context of optical beam profile monitors // The European Physical Journal D 77.3 (2023): 51, 2023.
80. Bank A. and Forck P. Residual gas fluorescence for profile measurements at the GSI UNILAC // Proceeding of DIPAC2003, 2003.
81. Goldman B. D. et al. Analysis of photon emission from 50–350 keV proton impact on H2O // Physical Review A, 83.4 (2011): 042701, 2011.
82. Monce M. N. et al. Excitations from dissociative fragments produced in $H^+ + H_2O$ collisions // Physical Review A, 79.1 (2009): 012704, 2009.
83. Edwards J. L. and Thomas E. W. Emissions from a molecular hydrogen target induced by the impact of fast protons // Physical Review, 165.1 (1968): 16, 1968.

84. Dotchin L. W. et al. Radiative lifetimes and pressure dependence of the relaxation rates of some vibronic levels in N2+, N2, CO+ and CO // The Journal of Chemical Physics, 59.8 (1973): 3960-3967, 1973.
85. Becker F. et al. Beam Induced Fluorescence Monitor-Spectroscopy in Nitrogen, Helium, Argon, Krypton, and Xenon Gas // Proceedings of BIW10, 2010.
86. Udrea S. et al. Preparatory work for a fluorescence based profile monitor for an electron lens // Proceedings of IBIC16, 2016.
87. Becker F. Beam induced fluorescence monitors // Proceedings of DIPAC2011, 2011.
88. Allison P. W. et al. An emittance scanner for intense low-energy ion beams // IEEE Transactions on Nuclear science, Vol. NS-30, No. 4, 1983.
89. ITS company. URL: http://www.itsvac.com
90. Richard C. et al. Measurement of a 2.1 MeV H^- beam with an Allison scanner // Review of Scientific Instruments, 91, 2020.
91. Senee F., Marroncle J. LEBT EMU and Dopler status // Proceedings of ESS BI Forum, 2016.
92. Stockli M.P. et al. Low-energy emittance studies with the new SNS Allison emittance scanner // Proceedings of PAC09, 2009.
93. Wong J.C. et al. High resolution phase space measurements with Allison-type emittance scanners // Physical Review Accelerator and Beams 22, 2019.
94. Pikin A. et al. Pepper Pot Emittance Meter // BNL Technote C-A/AP/#244, 2006.
95. Delerue N. et al. Observation of a H- beam at the CERN LINAC 4 test stand using a pepper-pot // Proceedings of IPAC10, 2010.
96. Hahn G., Hwang J.G. Development of a precision pepper-pot emittance meter // Proceedings of IBIC201919, 2019.
97. Cantero E. The status of beam diagnostics for the HIE-ISOLDE linac at CERN // Proceedings of IBIC2014, 2014.
98. Aleksandrov A. SNS Beam Diagnostics: Ten years after commissioning // Proceedings of IBIC2015, 2015.

99. Forck P., Kowina P., Liakin D. Beam position monitors // Synchrotron Radiation News, 1, 2008.
100. Cogan S. First results of button BPMs at FRIB // Proceedings of IBIC2018, 2018.
101. Power J. et al. Beam position monitors for the SNS linac // Proceedings of PAC2001, 2001.
102. Sato S. et al. Study of J-PARC linac beam position monitor as phase monitor // Proceedings of PAC2009, 2009.
103. Tan J. et al. Commissioning of the CERN LINAC4 BPM system with 50 MeV proton beams // Proceedings of IPAC2013, 2013.
104. Baron R. A. BPM electronics / Conceptual design review. ESS, 2017.
105. Varnasseri S. et al. Design and fabrication of stripline BPM for the ESS MEBT // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 987 (2021) 164835, 2021.
106. Adolphsen C.E. et al. Beam-Based Alignment Technique for the SLC Linac // SLAC-PUB-4902, 1989.
107. Tan J. et al. Beam position monitor system for the CERN LINAC4 // Proceedings of DIPAC2011, 2011.
108. Ziomek C., Corredoura P. Digital I/Q demodulator // Proceedings of PAC95, 1995.
109. Power J. et al. Beam position monitor systems for the SNS LINAC //Proceedings of PAC2003, 2003.
110. Baron R. et al. ESS Beam Position and Phase Monitor System // Proceedings of IBIC2019, 2019.
111. Zhao L. et al. Beam position and phase measurement system for the proton accelerator in ADS // IEEE Transactions on Nuclear Science, 61(1), 538-545, 2014.
112. Tan J. et al. Beam position monitor system for the CERN Linac4 // Proceedings of DIPAC2011, 2011.
113. Фещенко А. В. Разработка методов, средств и экспериментальное исследование микроструктуры пучка в линейных ускорителях ионов. Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н.: 01.04.20 / – М.: ИЯИ РАН, 2003.

114. Feschenko A. Methods and Instrumentation for Bunch Shape Measurements // Proceedings of PAC2001, 2001.
115. Witkover R. A. Non-destructive Bunch Length Monitor for a Proton Linear Accelerator // Nuclear Instruments and Methods, v. 137, No. 2, p. 203, 1976.
116. Tan J. LINAC4 diagnostics experience during commissioning // Proceedings of ARIES workshop «Experiences during hadron linac commissioning», 2021.
117. Plum M. Beam loss in linacs / Joint International Accelerator School, USA, 2014.
118. McCrady R. C. et al. Stripping of H– beams by residual gas in the linac at the Los Alamos Neutron Science Center // Proceedings of LINAC2010, 2010.
119. Hasegawa K. Status of J-PARC linac // Proceedings of LINAC2010, 2010.
120. Lebedev V. et al. Intrabeam stripping in H^- linacs // Proceedings of LINAC2010, 2010.
121. Групен К. Детекторы элементарных частиц / – Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999.
122. Holzer E. B. at al. Development, production and testing of 4500 beam loss monitors // Proceedings of EPAC’08 (CERN-AB-2008-054), 2008.
123. Grishin V. Ionization chambers as beam loss monitors for ESS linear accelerator // Proceedings of IBIC2017, 2017.
124. Saccani M. The beam loss monitoring system after LHC injectors upgrade at CERN // Proceedings of IBIC2021, 2021.
125. Zhukov A. Experience with the SNS loss monitoring and machine protection // Proceedings of PAC2013, 2013.
126. Lilley J. Nuclear Physics / – New York: Wiley, 2001.
127. https://atomtex.com/ru/products/dozimetry/dozimetry-neytronnye
128. Barnes M., Ducimetiere L. Ferrite materials for in-vacuum instruments // Proceedings of ARIES workshop «Materials and engineering technologies for particle accelerator beam diagnostics instruments», 2021.
129. Shafer R. E. Beam position monitor sensitivity for low-β beams // Proceedings of AIP Conference 1994, 1994.

130. Ostwald O. Time domain measurements using vector network analyzer ZVR // ZVR Application Note, 1998.
131. Chung Y., Decker G. Offset calibration of the beam position monitor using external means // Proceedings of AIP Conference 1992, 1992.
132. Nosych, A. A. et al. Measurements and calibration of the stripline BPM for the ELI-NP facility with the stretched wire method // Proceedings of IBIC2015, 2015.
133. Бронштейн И., Фрайман Б. Вторичная электронная эмиссия / – Москва: Наука, 1969.
134. Ernst E., Von Foerster H. Time dispersion of secondary electron emission // Journal of Applied Physics, V. 26, No. 6, pp. 781-782, 1955.
135. Feschenko A., Moiseev V. Peculiarities of Bunch Shape Measurements of High Intensity Ion Beams // Proceedings of IPAC’10, 2010.
136. ГОСТ Р 57700.44 – 2024 Численное моделирование физических процессов. – М.: Российский институт стандартизации, 2024.
137. Charpak G., Sauli F. Multiwire Proportional Chambers and Drift Chambers // Nuclear Instruments and Methods, V. 162, p. 405, 1979.
138. Boag J. W. Ionization measurements at very high intensities. Pulsed radiation beams // British Journal of Radiology, V.23 (274), p. 601, 1950.
139. Boag J. W. and Wilson T. The saturation curve at high ionization intensity // British Journal of Radiology, V. 3, p. 222, 1952.
140. Bielajew A. F. The effect of free electrons on ionization chamber saturation curves // Medical Physics, V. 12, p. 197 (1985).
141. NIST standard reference database, 2017. www.nist.gov.
142. Biagi database, 2010. www.lxcat.net.
143. Hagelaar G.J.M. and Pitchford L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // Plasma sources science and technology, V.14, №4, p. 722, 2005.
144. Blum W. et al. Particle Detection with Drift Chambers / – Berlin: Springer, 2008.

145. Boissonnat G. et al. Measurement of ion and electron drift velocity and electronic attachment in air for ionization chambers // arXiv:1609.03740, 2016.
146. Rawat P. et al. Absolute cross sections for dissociative electron attachment to H_2O and D_2O // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, V. 40, № 24, p. 4625, 2007.
147. Kowalski T. Z. and Mindur B. Manifestation of aging effect in gas proportional counters // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, V. 515(1), p. 180, 2003
148. Va'vra J. Wire aging // International workshop on aging phenomena in gaseous detectors, DESY, 2001.