

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

МА СЯОЧАО

«Развитие и применение методов диагностики пучков электронов для источника синхротронного излучения СКИФ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Актуальность темы исследования

Ускорители заряженных частиц и, в частности, создаваемые на их основе источники специализированного синхротронного излучения (ИССИ), являются не только инструментами получения новых научных знаний, но также стимулируют развитие самых передовых технологий и внедрение их в промышленность. Каждый ускоритель заряженных частиц являет собой систему сложных электрофизических устройств, которая зачастую является распределенной и разнесенной по модулям и подсистемам, что особенно характерно для крупных ускорительных комплексов, например ИССИ. Создание систем диагностики и управления для больших ускорительных комплексов – сложный процесс, определяющий качество научных данных, полученных в ходе работ на данном ускорителе. Необходимость точной диагностики и синхронного управления распределенными системами диктует возрастающие требования к качеству таких параметров как: - эффективность доступа к данным - скорость обработки экспериментальных данных - воспринимаемость обработанной информации, т.е. унифицированность предоставляемых данных и качество обработки - отказоустойчивость как оборудования, так и программного обеспечения. При разработке систем диагностики и управления краеугольным камнем является понимание процессов, лежащих в основе проводимых экспериментов и работы диагностических систем, благодаря которому возможно четкое формулирование задач при создании контрольно-измерительных систем. Для системы диагностики пучка анализ опыта эксплуатации современных электронных синхротронов показывает, что наиболее

критичными измерениями являются измерения положения пучка вдоль криволинейных орбит и линий перевода пучка между ускорителями. Не менее важным является измерение профиля пучка и основанное на нем измерение эмиттанса циркулирующих электронов. Оптимизация соответствующих измерителей представляет наибольший интерес. В свете развития проекта источника синхротронного излучения четвертого поколения, про датчики положения можно сказать следующее: уменьшение эмиттанса пучка потребует более точных измерений, что повышает требования к отношению сигнал/шум и, в результате, стимулирует разработку датчиков с улучшенным коэффициентом передачи от тока пучка к сигнальной линии. Повышения производительности можно достигнуть путем модификации геометрии датчиков положения, путем лучшего импедансного согласования с сигнальной линией и частотного согласования электроники и источника сигнала.

В составе сложных ускорительных комплексов всегда присутствуют отдельные составляющие, где параметры пучка не столь экстремальны, но, тем не менее, их знание необходимо для полноценного функционирования комплекса как целого. Поэтому создание адекватных методов диагностики пучка в разнообразных составляющих ускорительного комплекса (инжектор, электронно-оптические каналы, бустер) также является важной задачей, решение которой всегда сталкивается с необходимостью адаптации известного диагностического метода под конкретные технические параметры данного ускорителя. Зачастую для этого требуется решение сложных технических и научных задач, даже если речь идет о хорошо известных методиках.

Структура и содержание работы

Работа является законченным научным трудом и состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка иллюстративного материала, списка таблиц. Полный объем диссертации составляет 160 страниц, содержит 128 рисунков и 22 таблицы. Список использованной литературы содержит 86 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы. Сформулированы цель и задачи исследований, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, указан личный вклад автора в выполненные работы.

Первая глава посвящена историческому обзору развития установок синхротронного излучения на основе кольцевых ускорителей, а также кратко описано текущее положение в области диагностики параметров электронного пучка в таких установках. Дан краткий обзор параметров источника синхротронного излучения СКИФ.

Во второй главе посвящена вопросам проектирования системы диагностики пучка для линейного ускорителя СКИФ. На основании конструктивных требований ускорителя разработаны: люминофорный экран, магнитный спектрометр, черенковский датчик, цилиндр Фарадея, а также приведена схема измерения энергии пучка на выходе линейного ускорителя при 200МэВ. Представлены их ключевые параметры.

В третьей главе представлены результаты измерений параметров пучка с использованием всех разработанных диагностических инструментов на стенде линейного ускорителя. Профиль пучка измерялся с помощью люминофорных экранов с разрешением не хуже 0.03мм. Измерение эмиттанса на выходе ВЧ пушки выполнено с использованием соленоидального сканирования. Измеренное значение составило 10.9 ± 0.3 мм.мрад. Аналогичное измерение эмиттанса с использованием квадрупольной линзы при энергии пучка 32 МэВ дало значение 40 ± 0.3 мм.мрад. Энергетический разброс измерялся магнитным спектрометром. Длительность пучка определялась черенковскими датчиками в различных точках линейного ускорителя. Измерения заряда проводилось с помощью цилиндра Фарадея с поглотителем из Д16Т. Все разработанные приборы диагностики пучка позволили измерить параметры пучка с точностью, достаточной для настройки линейного ускорителя на расчетные параметры.

Четвертая глава описывает результаты разработки и применения оптической диагностической системы регистрации поперечных и продольных профилей пучка для бустера ИСИ СКИФ. Учитывая сходство ускорителя ВЭПП-3 с бустером, эта диагностика была протестирована на ВЭПП-3. Для проведения

измерений собрана установка прототипа диагностической системы в рабочем пространстве ВЭПП-3, а также Разработан комплект программного обеспечения на основе Python. Показана работоспособность системы.

В заключении представлены основные результаты работы и даны рекомендации по дальнейшему развитию работ.

Приложение А содержит все результаты измерений магнитного поля магнитного спектрометра.

Научная новизна диссертационной работы

Разработанный и изготовленный магнитный спектрометр обеспечивает высокий динамический диапазон диагностики (0,6-200 МэВ) при компактных размерах устройства. Магнитный спектрометр может измерять энергию пучка от 0,6 МэВ до 200 МэВ с точностью около 1%, а точность измерения энергетического разброса пучка составляет 10 - 15%. Временное разрешение разработанных черенковских датчиков, используемых для регистрации профиля, достигает 3-4 пикосекунд. Оптическая система диагностики на синхротронном излучении способна регистрировать динамику поперечного профиля пучка в многокадровом режиме.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

Для линейного ускорителя ИСИ СКИФ создан полный набор диагностических приборов, которые способны обеспечивать операторов установки информацией о параметрах пучка как на этапе запуска и отладки, так и при эксплуатации в штатном режиме. Эта диагностическая система соответствует требованиям долговременной стабильной работы и имеет достаточный динамический диапазон измерений. Разработана и прошла испытания на ускорителе ВЭПП-3 система оптической диагностики пучка в бустере СКИФ, предназначенная для измерения поперечного и продольного профиля пучка во время рабочего цикла бустера.

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов исследования

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, сопоставлением и удовлетворительным совпадением результатов экспериментов с результатами теоретического анализа и численного моделирования, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследователей, практической реализацией научных положений и выводов при создании конкретных устройств, используемых на действующем ускорителе ВЭПП-3 и созданном линейном ускорителе ИСИ СКИФ.

Соответствие паспорту научной специальности

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в области исследования «Получение пучков заряженных частиц, расчетно-теоретические и экспериментальные исследования параметров пучков» (п. 1, 3, 5, 7, 8 паспорта специальности).

Апробация работы

Результаты работы, изложенные в тексте диссертации, докладывались на 3 международных конференциях, включая RuPAC2021, на конкурсах молодых ученых ИЯФ СО РАН в 2020 и 2021 гг, а также были опубликованы в 6 научных трудах, 3 из которых в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. Получен патент на регистрацию программы для ЭВМ.

Автореферат соответствует содержанию диссертации

Замечания по диссертационной работе

1. Произведение размера на расходимость не является эмиттансом пучка, как написано в работе. Такое произведение иногда используют только для грубой оценки эмиттанса пучка.
2. На рисунке 1.1 указана энергия электронного пучка 300 МэВ, хотя в подписи к рисунку указано, что данные соответствуют энергии пучка 3 ГэВ.
3. На рисунке 1.4 даны V_x и V_z , однако не указана система координат, для которой приводятся значения данных величин.
4. На рисунке 1.13 приведена таблица из статьи Н. Koziel [31] с очень неудачным переводом. Так первым идет датчик тока пучка (а это может быть как трансформатор тока, он же индукционный датчик, так и цилиндр Фарадея). Кроме того, вызывают вопросы термины – Назначений и Тревожный. Я бы рекомендовал придерживаться классификаций, приведенных, например, в книге Москалев В.А., Сергеев Г.И., Измерение параметров пучков заряженных частиц, Москва, Энергоатомиздат, 1991
5. Во Введении в разных местах даны разные цифры для эмиттанса электронного пучка, ожидаемого на СКИФ. На стр. 28 он равен 75 пм.рад., а далее в этой же главе в таблице 1.1 приводится значение < 70 пм.рад.
6. Аналогичная ситуация с энергией пучка на выходе пушки. В таблице 2.1 энергия на выходе СВЧ пушки – 0.72 МэВ. Далее по тексту, практически сразу за таблицей, она равна 0.6 МэВ (стр.33). Надо отметить, что в каких-то местах говорится об СВЧ пушке, а в каких-то о ВЧ пушке. Это одна и та же пушка или разные.
7. В главе 2 при обсуждении материала для цилиндра Фарадея исследованы медь и свинец. А в главе 3 показано, что измерения проведены при поглотителе из Д16Т. Хорошо было бы дополнить проведенные исследования материалов цилиндра Фарадея и данными по материалу Д16Т, сравнив его с медью и свинцом.
8. Для правильности восприятия данных, представленных в таблице 2.3, хорошо бы дополнить таблицу строкой с указанием, в каком месте произведены измерения.

9. Необходимо привести описание «метода медитации» (стр.44), который используется при изготовлении люминофорного детектора.
10. При описании ССД камеры, используемой в люминофорной диагностике, необходимо привести спектр чувствительности камеры и проанализировать, насколько он подходит к спектру свечения выбранного люминофора.
11. При измерениях с использованием цилиндра Фарадея, необходимо принимать специальные меры для подавления вторичной эмиссии электронов, т.к. они могут внести существенный вклад в измерения. В работе ничего не сказано, какие меры принимались для подавления вторичной эмиссии электронов.
12. На правых графиках с результатами измерений длительности пучка черенковским датчиков (рис. 3.28 – 3.31) я бы рекомендовал заменить подпись к горизонтальной оси с «координаты» на «время».
13. Результат о газоотделении аэрогеля после прогрева до 200°C хорошо бы дополнить описать временно́й режим проведения прогрева, поскольку полученный результат представляет большой практический интерес.
14. Для удобства сравнения параметров бустера СКИФ и ВЭПП-3 можно порекомендовать свести параметры, представленные в таблицах 4.1 и 4.2 в одну таблицу.

Тем не менее, отмеченные недостатки не снижают высокого качества исследования. Они не влияют на главные результаты диссертации.

Заключение

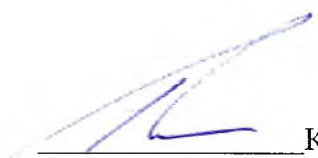
Диссертационная работа МА СЯОЧАО «Развитие и применение методов диагностики пучков электронов для источника синхротронного излучения СКИФ», полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени

кандидата технических наук по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Кулевой Тимур Вячеславович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации МА СЯОЧАО, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:
доктор технических наук (01.04.04 – Физическая электроника),
заместитель директора по научной работе по ускорительному направлению,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Адрес: 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
тел. +7 (499) 196-95-39
эл. почта: Kulevoy@itep.ru

10 ноября 2023 г.



Кулевой Тимур Вячеславович

Подпись Кулевого Т.В. удостоверяю
Главный Ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт»



Борисов Кирилл Евгеньевич