

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

Дубна, Московская область, Россия 141980 Dubna Moscow Region Russia 141980
Telefax: (7-495) 632-78-80 Tel.: (7-49621) 65-059 AT: 205493 WOLNA RU E-mail: post@jinr.ru http://www.jinr.ru

_____ № _____ «УТВЕРЖДАЮ»
на № _____ от _____
Директор Объединенного института ядерных исследований
д.ф.-м.н., академик РАН
_____ Г.В. Трубников
«17» _____ 2023 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

Никифорова Данилы Алексеевича

«Исследование динамики пучка электронов в мощном линейном индукционном ускорителе с фокусировкой на сосредоточенных элементах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Актуальность темы диссертации

В настоящее время в ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ ВНИИТФ ведется разработка линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) для различных применений. ЛИУ используются для генерации интенсивных электронных пучков с токами несколько кА, энергией до 100 МэВ и длительностью импульса до 1 нс. Такие параметры пучка позволяют использовать его как драйвер для генерации когерентного электромагнитного излучения. Вместе с тем, развитие ускорительной техники и методов расчета динамики таких пучков позволило повысить качество пучка электронов (малый эмиттанс и энергетический разброс). Это обстоятельство открывает широкие возможности для генерации когерентного излучения в терагерцовом (ТГц) диапазоне. В настоящее время проект генератора излучения по схеме лазера на свободных электронах (ЛСЭ), способного работать в интервале частот от субмиллиметрового до терагерцового диапазонов и высокой импульсной мощностью, развивается в сотрудничестве ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) и ИПФ РАН (г. Нижний Новгород). Импульсы ТГц-излучения с большой мощностью в узкой полосе частот востребованы в целом ряде различных применений, например, в ускорителях с высоким градиентом, в области исследований свойств различных веществ, а также для синтеза новых материалов. Основным требованием к

используемому сильноточному РЭП в ЛСЭ является минимальный разброс по продольным скоростям электронов, которой обусловлен разбросом энергий электронов и эмиттансом пучка. Важнейшей задачей, стоящей в ходе транспортировки и ускорения пучка в структуре ЛИУ, является сохранение его яркости, которая характеризует плотность тока в поперечном фазовом пространстве пучка и временной стабильности поперечного положения пучка на протяжении всего импульса. Диссертационное исследование Никифорова Д.А. посвящено построению электронно-оптической модели ускорительного комплекса ЛИУ, а также теоретическому и экспериментальному исследованию динамики пучка. Результаты работы Никифорова Д.А. по построению численной модели ускорителя и подавлению различных нежелательных эффектов в поперечной динамике пучка, позволили осуществить эффективную транспортировку интенсивного электронного пучка с сохранением его качества.

Оценка структуры и содержания диссертации

Диссертация Никифорова Д.А. состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и списка иллюстративного материала. В заключении приводятся результаты выполненного исследования и перспективы дальнейшей разработки темы. Полный объем диссертации составляет 94 страницы, включая 42 рисунка. Список литературы содержит 61 наименование.

Во введении представлен общий обзор экспериментов по генерации ТГц излучения с помощью пучка из ЛИУ. Описаны основные эффекты в поперечной динамике пучка, влияющие на эффективность генерации излучения. Обсуждена актуальность диссертационного исследования и сформулированы ее цели. Описаны структура и объем диссертации.

Первая глава содержит описание структуры ЛИУ. Среди основных элементов структуры описаны следующие: инжектор электронов, система фокусировки и коррекции орбиты пучка, ускоряющая система, система диагностики пучка. Приведена схема ускорительного комплекса ЛИУ, в которой содержатся все описываемые элементы.

Вторая глава посвящена обсуждению методов моделирования поперечной динамики электронного пучка с учетом эффекта пространственного заряда. Также во второй главе проводится подробный анализ различных факторов роста эмиттанса пучка в инжекторе, линейном ускорителе и боковых каналах разводки пучка.

Третья глава содержит описание результатов экспериментов по транспортировке пучка и измерению его различных параметров. Были описаны следующие работы:

1. Эксперименты по восстановлению параметров пучка на выходе из электронной пушки с применением генетического алгоритма. Восстановленные начальные условия были применены для моделирования транспортировки пучка во всем ускорителе.
2. Инжекция пучка в опытный боковой канал разводки пучка. Для оценки качества пучка в конце бокового канала, пучок фокусировался на тонкую измерительную танталовую пластину, установленную непосредственно после

линзы финального фокуса в конце канала. При этом выполнялся контроль размеров пучка на пластине методом регистрации тормозного излучения.

3. Коррекция орбиты пучка в ЛИУ методом матриц отклика пучка на дипольные корректоры.
4. Эксперимент по транспортировке и фокусировке пучка в ускорительном комплексе ЛИУ с энергией до 15 МэВ. В этом комплексе пучок электронов генерировался в инжекторе и инжектировался в линейный ускоритель. Фокусировка пучка в тракте линейного ускорителя осуществлялась 69 импульсными магнитными аксиально-симметричными линзами. После процесса ускорения пучок инжектировался в транспортный канал с квадрупольной фокусировкой. В конце транспортного канала располагался триплет квадрупольных линз и линза финального фокуса. Эксперименты по проводке пучка на ускорителе с энергией до 5 МэВ позволили создать численную модель огибающей пучка, которая позволила транспортировать пучок без потерь с сохранением качества и осуществить его дальнейшую фокусировку до размера меньше 2 мм.
5. Эксперимент по инъекции пучка из ЛИУ в систему компрессии ЛСЭ.

В заключении диссертации представлены итоги диссертационной работы, сформулированы ее результаты.

Основные результаты, представленные к защите, заключаются в следующем:

1. Проанализированы факторы прироста эмиттанса пучка в различных частях ускорительного комплекса ЛИУ.
2. С помощью численных расчетов и аналитического метода теории возмущений исследована динамика сильноточного пучка в инжекторе.
3. На основе результатов исследований был предложен подход к модификации оптики пушки, обеспечивающий равномерное пространственное распределение частиц пучка. Это распределение является необходимым условием для стационарного состояния пучка в процессе его ускорения в ЛИУ.
4. На основе модели пучка Капчинского-Владимирского проведена оптимизация электронно-оптической системы индукционного ускорителя для различных значений энергии и тока пучка. Данная оптимизация позволила обеспечить транспортировку пучка без потери тока и с сохранением эмиттанса, необходимого для достижения размера фокусного пятна на измерительной пластине не более 2.0 мм.
5. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность отклонения и транспортировки пучка с током выше 1 кА на угол 24 градуса в транспортном канале сложной геометрии ускорителя ЛИУ с последующей его фокусировкой до размера 1.5 мм.
6. С помощью оптимизированной электронно-оптической системы ускорителя экспериментально продемонстрирована возможность магнитной компрессии пучка с диаметра 4 см до диаметра 10 мм и последующей транспортировки сжатого пучка на длину 0.65 м, что является необходимым условием для реализации схемы ЛСЭ на базе пучка из ЛИУ.

7. Реализована коррекция орбиты пучка во всем ускорительном комплексе методом матриц отклика.

Сформулированные в заключении результаты соответствуют положениям, представленным для защиты во введении диссертации.

Научная новизна диссертационной работы

1. Впервые была создана электронно-оптическая модель для линейного индукционного ускорителя с дискретной системой фокусировки.
2. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность поворота пучка с током выше 1 кА на угол 24^0 в боковом канале сложной геометрии ускорителя ЛИУ с полным сохранением его качества.
3. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность магнитной компрессии пучка с током выше 1 кА до диаметра 6 мм и последующей транспортировки сжатого пучка в системе ЛСЭ, предложенного в исследовании.

Научная и практическая значимость полученных результатов

1. В работе проведены аналитические и численные расчеты различных факторов, влияющих на поперечную динамику пучка в линейном индукционном ускорителе. По результатам анализа были предложены изменения в конструкции электронной пушки. Реализация этих изменений позволит получить согласованный поперечный профиль и фазовый портрет пучка в точке инжекции в линейный фокусирующий канал основного линейного ускорителя. Указанное согласование является необходимым условием минимизации эффекта роста эмиттанса за счет релаксации поперечных зарядовых колебаний в интенсивном пучке.

2. Создана электронно-оптическая модель движения пучка в структуре ЛИУ; эта модель позволяет обеспечить транспортировку пучка в тракте линейного ускорителя без потерь и с сохранением его качества.

3. Согласно моделированию предложенной схемы ЛСЭ, при параметрах пучка, полученного на выходе из ЛИУ с дискретной фокусирующей системой, можно достигнуть эффективности передачи энергии от электронов пучка к генерируемому потоку излучения на уровне 2 - 3 %. Это обеспечивает достижение мощности масштаба 100 МВт в потоке излучения W-диапазона, что можно считать большим научным достижением вакуумной электроники.

Замечания по диссертационной работе

1. Для ЛСЭ основными тремя характеристиками являются длины волны, мощность излучения и яркость. Мощность ЛСЭ на основе ЛИУ является рекордной, но в диссертации ничего не говорится о яркости ЛСЭ на основе индукционного линейного ускорителя и его сравнении по этому параметру с другими ЛСЭ, работающими в этом диапазоне длин волн (особенно ТГц).
2. Не обсуждаются расчеты динамики потерь пучка в вакуумной камере ондулятора при его компрессии. Для пучка с длительностью около 100 нс через вакуумную камеру ондулятора проходит примерно половина частиц для импульса с реальным профилем напряжения ($\delta\gamma/\gamma \approx 3-5\%$)

и энергетическим разбросом из-за провисания потенциала из-за эффектов пространственного заряда.

Данные замечания несколько не снижают качества данной работы и значимости полученных результатов.

Заключение Секции физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники Общественного семинара

1. Содержание диссертационной работы Никифорова Даниила Алексеевича «Исследование динамики пучка электронов в мощном линейном индукционном ускорителе с фокусировкой на сосредоточенных элементах» соответствует паспорту научной специальности 1.3.18 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Диссертация представляет собой выполненную на высоком научном уровне законченную научно-исследовательскую работу. Результаты, полученные во второй главе диссертации (создание новой оптической схемы электронной пушки с малым эмиттансом), несомненно будут использованы при создании подобного рода ускорителей в будущем.

2. Представленные в работе результаты исследований актуальны, убедительны, обладают признаками новизны и оригинальности, выводы и заключения аргументированы и обоснованы.

3. Судя по публикациям и по докладу соискателя на семинаре, вклад автора в результаты представленной работы является определяющим. Выносимые на защиту положения подтверждают персональный вклад автора в представленную работу.

4. Автореферат оформлен в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии и в достаточной мере отражает содержание диссертации.

5. Диссертация Никифорова Д.А. «Исследование динамики пучка электронов в мощном линейном индукционном ускорителе с фокусировкой на сосредоточенных элементах» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Никифоров Данила Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Отзыв составил:

Главный инженер установки Ускорительный комплекс Коллайдера NICA, доктор физико-математических наук, профессор, специальность 01.04.20 (1.3.18) – физика пучков

заряженных частиц и ускорительная техника

Сыресин Евгений Михайлович

Тел.: +7 (496) 216-50-59, e-mail: esyresin@jinr.ru

Подпись 

Дата 7.07.2023

Материалы диссертации Никифорова Д.А. «Исследование динамики пучка электронов в мощном линейном индукционном ускорителе с фокусировкой на сосредоточенных элементах», а также отзыв на диссертацию рассмотрены и одобрены на заседании секции физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники Общественного семинара Международной межправительственной организации Объединенного института ядерных исследований 07 июня 2023 г.

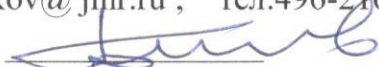
Председатель Секции физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники Общественного семинара. Специальный представитель директора Института по сотрудничеству с международными и российскими научными организациями
Академик РАН, д.ф.м.н.,

Борис Юрьевич Шарков

Специальность 01.04.20 (1.3.18) – физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

e-mail: sharkov@jinr.ru; тел. 496-2165060

Подпись



Дата

11.07.2023

Подписи Сыресина Е.М. и Шаркова Б.Ю. заверяю:

Главный ученый секретарь ОИЯИ,

кандидат физико-математических наук

Неделько Сергей Николаевич

Подпись



Дата

17.07.2023

Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)

Почтовый адрес:

141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Тел.: +7 (496) 216-50-59, факс: +7 (496) 216-51-46

E-mail: post@jinr.ru Сайт организации: <http://www.jinr.ru/>