

УТВЕРЖДАЮ

Проректор МГУ

имени М.В. Ломоносова

профессор А.А. Федянин



ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Сухих Леонида Григорьевича «Измерение размеров микронных электронных пучков высокой энергии на основе переходного излучения», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Предметом исследования представленной диссертационной работы являются вопросы измерения поперечных размеров релятивистских электронных пучков микронных поперечных размеров, которые в настоящее время генерируются лишь на нескольких существующих ускорителях. Автором теоретически и экспериментально исследованы особенности визуализации поперечного профиля электронных пучков с помощью переходного излучения в спектральных диапазонах видимого света и вакуумного ультрафиолета.

Проведенное исследование является **актуальным** в связи с тем, что для электронных пучков высоких энергий с поперечными размерами микронного уровня в настоящее время отсутствуют общепризнанные методы

диагностики. Интерес к генерации таких пучков обусловлен двумя направлениями развития ускорительной физики и техники: создание источников рентгеновского синхротронного излучения, ограниченных дифракционным пределом (так называемых источников 4-го поколения), на основе накопительных колец и создание линейного электрон-позитронного коллайдера для детального изучения свойств бозона Хиггса и поиска новой физики за пределами Стандартной модели. В случае кольцевых ускорителей очевидными методами диагностики являются методы, основанные на синхротронном излучении. Исследование Сухих Л.Г. нацелено на разработку методов диагностики для линейного коллайдера, для настройки и стабильной работы которого необходимы десятки мониторов поперечного размера пучка, работающие с точностью не хуже 1 микрометра. Существующие к настоящему моменту времени мониторы, например, лазерные проволоочки, могут обеспечить требуемое разрешение, но очень дороги в создании и эксплуатации, поэтому не могут быть реализованы в требуемом количестве. Диссертационное исследование состоит из введения, четырёх глав и заключения; содержит 196 страниц текста, 99 рисунков, список литературы включает в себя 171 источник.

Первая глава диссертационного исследования посвящена обзору современных методов диагностики поперечного размера и профиля электронных пучков с размерами порядка единиц микрометров. В главе рассмотрены методы диагностики на основе материальных проволочек, лазерных проволочек, интерференции лазерных лучей, синхротронном излучении, переходном излучении, дифракционном излучении и излучении сцинтилляторов. Для всех рассмотренных методов проведён анализ их сильных и слабых сторон и возможностей применения в линейном электрон-позитронном коллайдере.

Вторая глава диссертационного исследования посвящена теоретическому рассмотрению вопросов визуализации поперечного профиля электронных пучков. Автором рассмотрен процесс генерации излучения наклонными мишенями, показано влияние эффекта глубины фокуса на получаемые изображения. Разработан подход, позволяющий определить размер пучка, и продемонстрировано хорошее согласие с экспериментальными данными, для функции аппроксимации, которая вычислена автором в предположении нормальности распределения пучка. Рассмотрены особенности визуализации поперечного профиля пучка, при использовании линейно поляризованного излучения.

Третья глава диссертационного исследования посвящена экспериментальному измерению изображений электронного пучка разрезного микротрона МАМI-B (г. Майнц, Германия) с размером порядка 1,5-2 мкм и энергий 855 МэВ на основе переходного излучения в видимом диапазоне длин волн (400 нм). Визуализация поперечного профиля проводилась с использованием двухзеркального объектива Шварцшильда, разработанного в ФИАН им. П.В. Лебедева (г. Москва), что позволило получать изображения с коэффициентом увеличения оптической системы $M=42$. В этой главе представлены результаты визуализации поперечного профиля электронного пучка, полученные с помощью переходного излучения (среднеквадратичное отклонение $\sim 1,8$ мкм) и с помощью сцинтиллятора толщиной 200 мкм (среднеквадратичное отклонение $\sim 1,5$ мкм), которые достаточно хорошо согласуются между собой. Также представлен анализ возможных причин расхождения полученных результатов, среди которых основной является использование переходного излучения естественной поляризации.

Четвёртая глава диссертационного исследования посвящена вопросам генерации и визуализации переходного излучения в спектральной области

вакуумного ультрафиолета (20 нм). В начале главы автор разрабатывает теоретическую модель для расчёта характеристик обратного переходного излучения на основе модели идеальной проводимости и коэффициентов отражения Френеля и сравнивает её предсказания с предсказаниями хорошо известной модели Пафомова. Далее автор описывает два этапа экспериментального исследования, посвященных регистрации углового распределения обратного переходного излучения и визуализации поперечного профиля пучка с использованием сферического зеркала, как в области видимого света, так и в области вакуумного ультрафиолета. Автором продемонстрирована хорошая сходимость результатов измерения размеров пучка в обоих спектральных диапазонах.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования, выводы и положения, выносимые на защиту.

Основные результаты работы заключаются в том, что:

- Визуализация обратного переходного излучения является одним из наиболее перспективных и проработанных вариантов измерения (мониторинга) поперечного размера пучков микронных размеров с субмикронным разрешением. В видимом диапазоне длин волн (400 нм) возможно определять размеры электронного пучка порядка 1 микрона.
- Разработанная теоретическая модель построения изображений электронных пучков от наклонных мишеней с учётом возможных хроматических aberrаций позволяет проводить «численные эксперименты», определяя необходимые параметры установок и оптических систем. Разработанная модель может использоваться для верификации расчётов численных кодов, широко используемых в оптике, основанных на распространении поперечных электромагнитных волн (ZEMAX и др.). Разработанная модель работоспособна для длин волн от вакуумного ультрафиолета до инфракрасного диапазона и учитывает используемый материал мишени.

– Найденная функция аппроксимации проекций (профилей) изображений, полученных при доминировании SPF, позволяет определять абсолютные значения поперечного размера пучка. Для использования данной функции не требуется проведение сложных процедур самокалибровки получаемых изображений профиля пучка.

– Проведённый эксперимент по визуализации поперечного профиля пучка в видимом диапазоне длин волн показал, что:

1. На основе излучения тонкого сцинтиллятора и обратного переходного излучения в видимом диапазоне возможно измерять размеры пучков порядка 1,5 мкм, используя коммерчески доступные оптические элементы.

2. Использование двухзеркальных объективов Шварцшильда для визуализации переходного излучения является возможным и перспективным и может применяться для получения большого увеличения при минимизации влияния хроматической и сферической аберраций.

3. Результаты расчёта по разработанной модели и результаты эксперимента качественно сходятся при учёте влияния обеих компонент поляризации переходного излучения.

4. Найденная функция аппроксимации позволяет определить минимальный размер электронного пучка, как правило, вертикальный, на основе изображений, полученных при доминировании функции одного электрона. Использование данной функции аппроксимации позволяет существенно упростить анализ изображений.

5. Точность определения вертикального размера пучка на основе обратного переходного излучения (без учета систематической погрешности) составляет порядка 0,1 мкм (оценка ошибки аппроксимации).

– Проведенный эксперимент по исследованию свойств обратного переходного излучения и визуализации пучка в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета показал, что:

1. Переходное излучение в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета, генерируемое Mo мишенями, уверенно регистрируется ПЗС-

камерой без усиления, его интенсивность выше, чем предсказано существующей теорией, угловые распределения хорошо описываются теорией.

2. Визуализация поперечного профиля электронного пучка в диапазоне вакуумного ультрафиолета на основе однозеркальной оптической схемы и сравнение полученных результатов с измерениями в оптическом диапазоне показали принципиальную возможность использования данного спектрального диапазона в мониторинге профиля пучка.

3. Анализ полученных результатов (изображений пучков в разных диапазонах) с использованием разработанной теоретической модели построения изображений и найденной функцией аппроксимации показал очень хорошее согласие размеров пучков, полученных в спектральных диапазонах вакуумного ультрафиолета и видимого света.

4. Визуализации обратного переходного излучения в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета является перспективной методикой для измерения пучков с размером порядка ста нанометров.

Достоверность и обоснованность представленных автором результатов подтверждается использованием известных подходов при проведении теоретических расчётов и построении моделей, проведением экспериментальных исследований на низкоэмиттансном пучке разрезного микротрона МАМІ-В, результатами сравнения экспериментальных данных, полученных на основе разных методик, между собой и с расчётами по разработанным моделям. Результаты работы неоднократно докладывались на авторитетных международных конференциях по физике пучков заряженных частиц и ускорительной технике, по физике взаимодействия пучков заряженных частиц с веществом и опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, включая журналы «Письма в ЖЭТФ», «Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams», «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, Section B». Следует отметить, что основные

результаты диссертационной работы были получены в коллаборации с учёными ведущих мировых научных центров: DESY (г. Гамбург, Германия), Johannes Gutenberg University (г. Майнц, Германия) и ФИАН им. П.В. Лебедева (г. Москва).

Научная новизна полученных в диссертационном исследовании результатов заключается в том, что были проведены первые в мире экспериментальные исследования по генерации переходного излучения в спектральной области вакуумного ультрафиолета, а также впервые были проведены измерения поперечного профиля пучка с использованием излучения в данном спектральном диапазоне. Также впервые была предложена и реализована оптическая схема визуализации профиля пучка на основе двухзеркального объектива Шварцшильда.

В представленном диссертационном исследовании можно отметить ряд недостатков:

1. Автор предполагает Гауссов профиль электронного пучка после кольца радиационного охлаждения, но не обсуждает вопрос сохранения этого профиля в процессе дальнейшего ускорения электронного пучка.
2. На стр. 59 описывается влияние возможного эффекта хроматической абберации на уширение изображения от одного электрона, но не приводит примеров этого эффекта и не сравнивает его с эффектом дефокусировки. Для предложенной функции аппроксимации приведены неопределенности вычисления соответствующих коэффициентов, однако отсутствуют данные характеризующие точность аппроксимации, только рисунки. Возможно, для увеличения точности, стоило бы при нахождении коэффициентов аппроксимации отбрасывать точки со значениями $|y_i/M| > 10$.
3. В разделе 2.3 автор демонстрирует подход к расчёту изображения пучка от наклонённой мишени, что позволяет оценить влияние эффекта

глубины фокуса. В дальнейшем автор проводит расчёт для угла поворота мишени 45 градусов. Считаем, что автору следовало оценить величину эффекта глубины фокуса для различных углов поворота мишени при различных числовых апертурах линзы, чтобы оценить этот эффект для эксперимента, описанного в 4-ой главе, где угол поворота мишени составлял 72 градуса.

4. На стр. 74 автор применил разработанную функцию аппроксимации к расфокусированным частям изображения пучка, но не привел анализа полученных результатов, а именно причин полученного расхождения. Так как при дефокусировке происходит деградация изображения одиночного электрона встаёт вопрос о применимости функции вида (2.16) к таким изображениям.
5. На стр. 105 приведён размер пучка, оцененный из данных, полученных на основе визуализации изображения сцинтиллятора без указания неопределённости.
6. На стр. 108 на рис. 3.8 приведено экспериментально зарегистрированное изображение пучка от многослойной молибденовой мишени, которое имеет асимметрию интенсивности между верхней и нижней частью изображения, но не приведено пояснение данной особенности, не предсказываемой теоретическим расчётом. На рис. 3.12 присутствуют явно выбивающиеся точки, стоило бы их исключить при проведении процедуры аппроксимации.
7. В разделе 3.3.3 приведено рассмотрение вопросов внеосевой фокусировки излучения объективом Шварцшильда. Данный раздел достаточно интересен с практической точки зрения, но, к сожалению, описан недостаточно хорошо. Автору следовало бы провести моделирование изображений для указанной геометрии.
8. Среди общих замечаний по работе следует отметить наличие орфографических ошибок и опечаток по тексту, использования рисунков и формул с подписями на английском языке, использование

жаргонных терминов, таких как «плоский пучок», «бананообразная форма» и др. В некоторых случаях наблюдается несовпадение обозначений в формулах и на рисунках (например, ф-ла 4.10 и рис. 4.2).

Указанные недостатки не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы Сухих Л.Г., которая вносит важный вклад в развитие методов диагностики пучков заряженных частиц ускорителей нового поколения. Полученные результаты имеют как теоретическую, так и практическую значимость. Они должны быть использованы при разработке систем диагностики поперечного профиля пучков линейного электрон-позитронного коллайдера. Если внедрение диагностики по излучению в ВУФ диапазоне является отдалённой перспективой, то использование результатов, полученных в видимом диапазоне, не имеет никаких препятствий. Предложенная модернизация диагностических схем в видимом диапазоне имеет особую значимость в связи с тем, что стратегия научно-технологического развития страны предусматривает создание в России ускорительных проектов класса «мегасайнс» с использованием электронных пучков, таких как ИССИ-4 Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

Результаты диссертационной работы опубликованы в 31 публикации, из которых 21 публикация в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, и 11 публикаций, в журналах с импакт-фактором больше единицы, входящих в базы данных Web of Science и Scopus. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Сухих Леонида Григорьевича «Измерение размеров микронных электронных пучков высокой энергии на основе переходного излучения», представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – «Физика

пучков заряженных частиц и ускорительная техника» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны и экспериментально верифицированы теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

Диссертационная работа и содержание отзыва обсуждены и одобрены на заседании кафедры Физики Ускорителей и Радиационной Медицины, протокол №15 от 22 мая 2018 г.

Официальный адрес

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы,
МГУ имени М.В. Ломоносова, Дом 1,
строение 2, Физический Факультет,
кафедра Физики Ускорителей и Радиационной медицины
раб. тел. (495) 939-49-46
E-mail: BelousovAV@physics.msu.ru

Ученый секретарь кафедры

Доцент

Александр Витальевич Белоусов

Зав. каф. ФУиРМ

профессор

Александр Петрович Черняев

