

Отзыв
официального оппонента на диссертацию
СУХИХ ЛЕОНИДА ГРИГОРЬЕВИЧА
«ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ МИКРОННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ВЫ-
СОКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математи-
ческих наук по специальности 01.04.20 - Физика пучков заряженных ча-
стиц и ускорительная техника

Диссертация Сухих Л. Г. посвящена развитию метода диагностики пучков заряженных частиц с микронными поперечными размерами и состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов и списка литературы. Работа содержит аналитические расчёты, математическое моделирование, разработку экспериментальной установки и проведение измерений в рамках тематики исследования. Все задачи исследования выполнены на достаточно высоком уровне.

Актуальность представленной работы не вызывает сомнений. Прогресс в ускорительной физике привел к тому, что поперечные и продольные размеры пучков электронов и позитронов в современных установках стали настолько малы, что их уверенное и достоверное измерение становится весьма сложной задачей. Разработка надежных методов диагностики, позволяющих работать с пространственным разрешением на уровне долей микрометра – это суровая необходимость ближайших лет, и эта проблема существует при диагностике пучка частиц как в циклических, так и линейных ускорителях. В циклических ускорителях естественным путем развития методов измерения размеров пучка является использование синхротронного излучения (СИ) в возможно более коротковолновой области. В линейных ускорителях пучок частиц не испускает СИ, поэтому в работе Л. Г. Сухих предлагается, теоретически обосновывается и экспериментально проверяется возможность применения диагностики попе-

речного профиля пучка частиц субмикронного размера с помощью регистрации обратного переходного излучения в диапазоне вакуумного ультрафиолета.

Признаюсь, я рад, что мне пока что не пришлось столкнуться с необходимостью создания диагностики, работающей в этой спектральной области, поскольку уровень технических проблем, которые приходится решать при этом, на порядок превосходит те, с которыми имеешь дело в привычной оптической области. В связи с этим хочется выразить уважение автору диссертации, не побоявшемуся столкнуться с этими проблемами и сумевшему большинством из них успешно их преодолеть.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые в мире проведена визуализация поперечного профиля пучка на основе обратного переходного излучения в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета. Было подтверждено, что измерение поперечных размеров пучка в диапазоне ВУФ обеспечивает лучшее пространственное разрешение по сравнению с оптическим диапазоном длин волн.

- впервые в мире был использован объектив Шварцшильда для визуализации поперечного профиля электронного пучка. В ходе эксперимента были получены и проанализированы изображения электронного пучка с вертикальным размером $\sigma_y \approx 1,5$ мкм.

- впервые в мире продемонстрирована возможность измерения профиля пучка с микронным поперечным размером при помощи сцинтилляционного экрана.

Достоверность и обоснованность результатов исследований

Развитые в диссертации теоретические расчеты и экспериментальные методы диагностики пучков заряженных частиц были апробированы в экспериментах на разрезном микротроне MAMI-B Университета им. Гутенберга (г. Майнц, Германия). При проведении экспериментов производилось сопоставление данных, полученных при помощи нескольких независимых методик. Результаты экспериментов неоднократно докладывались на научных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах.

Значимость полученных результатов для дальнейшего развития науки

Автором предложен метод определения минимального поперечного размера пучка при доминировании SPF (single particle function), что до сих пор считалось невозможным, а соответствующий диапазон параметров назывался «слепой зоной». Хотя метод и не вполне проверен экспериментально, но теоретическая оценка пространственного разрешения метода сделана с учетом разнообразных факторов, способных исказить данные измерений. Важным экспериментальным результатом, полученным автором, является убедительная демонстрация возможности измерения при помощи сцинтилляционных экранов поперечных размеров пучков микронного диапазона. Вертикальный размер пучка, определенный с помощью сцинтилляционного экрана, сопоставлен с результатами, полученными при регистрации обратного переходного излучения. Хотя данные обоих методов, несколько различаются, однако причина этого несовпадения получила разумное объяснение.

Во *Введении* диссертации обосновывается актуальность работы, определяемая как перспективными планами строительства новых линейных электрон-позитронных коллайдеров на сверхвысокие энергии для исследований по физике элементарных частиц, так и появлением все новых лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), где также требуется информация о поперечном профиле пучка с пространственным разрешением в единицы микрометров. Автором убедительно показывается, что «...имеющиеся и достаточно широко используемые мониторы по измерению поперечного профиля электронных пучков на основе обратного переходного излучения в видимом диапазоне длин волн достигли своих пределов». Естественным путем расширения возможности данного вида диагностики является переход в диапазон вакуумного ультрафиолета. Для этого требуется решить ряд сложных теоретических и экспериментальных задач, что и стало предметом диссертации. В итоге проделанной работы было показано, что существует «...принципиальная возможность и техническая реализуемость разработки и создания мониторов поперечного

профиля пучка в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета, что позволяет в теории получать изображения пучков с минимальными размерами порядка $\sigma_y \approx 50$ нм». Импонирует, что автор детально перечислил вклад своих коллег по работе в теоретические и экспериментальные исследования, ставшие основой диссертации.

В *первой главе диссертации* сделан обстоятельный обзор способов измерения размеров пучков с пространственным разрешением лучше одного микрометра. Глава написана столь хорошо, что с минимальными доработками может быть опубликована в качестве обзора методов диагностики поперечного профиля пучков с субмикронным разрешением в соответствующем журнале. Могу порекомендовать автору обратиться в редакцию журнала «Физика элементарных частиц и атомного ядра».

Вторая глава посвящена теоретическому анализу процесса визуализации обратного переходного излучения от наклонной мишени с учётом поляризационных характеристик излучения. Также во второй главе приведён анализ получаемых в расчёте изображений пучка и предложена рациональная функция аппроксимации для извлечения поперечного размера пучка для случая распределения с двумя максимумами.

Третья глава посвящена экспериментальной визуализации поперечного профиля электронного пучка с вертикальным размером порядка $\sigma_y \approx 1,5$ мкм в видимом диапазоне длин волн с использованием оптики на основе двухзеркального объектива Шварцшильда.

Четвертая глава посвящена исследованию характеристик обратного переходного излучения в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета и его визуализации с использованием сферического зеркала. В начале главы подробно разбираются существующие подходы и методы расчетов характеристик излучения.

В *Заключении* приведены основные результаты работы. Автором показано, что

– Визуализация обратного переходного излучения является одним из перспективных вариантов измерения поперечного размера пучков микрометровых размеров с субмикронным разрешением.

- Разработана теоретическая модель построения изображений электронных пучков от наклонных мишеней с учётом возможных хроматических аберраций, что позволяет определять необходимые параметры диагностических систем, основанных на регистрации обратного переходного излучения.

- Найденная функция аппроксимации проекций (профилей) изображений, полученных при доминировании SPF, позволяет определять абсолютные значения поперечного размера пучка в предположении его Гауссового профиля. Для использования данной функции не требуется проведение сложных процедур самокалибровки, и указанная функция позволяет работать во всём диапазоне размеров пучка (при существенном влиянии SPF, при слабом влиянии SPF, при пренебрежимо малом влиянии SPF).

- Проведенный эксперимент по визуализации поперечного профиля пучка в видимом диапазоне длин волн продемонстрировал возможность измерять размеры пучков порядка 1,5 мкм.

- Использование двухзеркальных объективов Шварцшильда для визуализации переходного излучения возможно для получения большого увеличения.

- Результаты расчёта по разработанной модели и результаты эксперимента качественно сходятся, если учитывается влияние обеих компонент поляризации.

- Разработанная функция аппроксимации позволяет определить вертикальный размер электронного пучка на основе изображений, полученных при доминировании SPF.

- Точность ошибки аппроксимации определения вертикального размер пучка на основе обратного переходного излучения (не учитывая систематической погрешности) составляет порядка 0,1 мкм

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 уверенно регистрируется ПЗС-камерой, угловые распределения хорошо описываются теорией.

2. Визуализация поперечного профиля электронного пучка в диапазоне видимого света и ультрафиолета на основе однозеркальной оптической схемы показала 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 хорошее согласие размеров пучков, полученных в спектральных диапазонах вакуумного ультрафиолета и видимого света.

Замечания

Несмотря на отмеченную ценность полученных результатов, работа имеет следующие недостатки:

Стр. 49. Вообще говоря, форма пучка в линейном ускорителе – это не распределение Гаусса. Отклонение поперечного распределения частиц от Гауссовой кривой может быть очень заметной.

Стр. 67. Желательно определить степень монохроматичности и то, как она влияет на пространственное разрешение предлагаемого метода. Автором показано, что измерение пучков микронных размеров с помощью обратного переходного излучения возможно и в оптической области спектра. В таком случае применение рефракционной оптики гораздо проще и дешевле, чем зеркальной.

Стр. 70. Предложенный подход приводит к возникновению модельно-зависимой диагностики. Это весьма нежелательное явление.

Стр. 74. Из текста сложно понять, равна ли разность извлеченного и истинного размера пучка точности предложенного метода? Насколько будут отличаться сечения изображений пучков с rms 1.0 мкм и 0.9 мкм при $x/M = 20$ мкм? Как на результатах фиттирования скажется добавление случайного шума на уровне 2-3 процента от максимума сигнала, что неизбежно произойдет в экспериментальных условиях?

Стр. 75. Рис. 2.166. Почему относительная разница немонотонно ведет себя в области, где SPF не играет роли?

Стр. 98. На мой взгляд, следовало аккуратно, на специальном стенде, измерить оптические характеристики объектива Шварцшильда, особенно с учетом его почтенного возраста. В частности, при работе в оптическом диапазоне, особенно при использовании объектива Шварцшильда во внеосевой геометрии, необходимо иметь представление о его аппаратной функции.

Коэффициент отражения зеркал в области вакуумного ультрафиолета также можно было измерить, например, при содействии проф. Г. Кубе. Еще проще такие измерения провести на пучке синхротронного излучения ускорителя ВЭПП-4М (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск).

Непонятна ссылка на низкую интенсивность излучения в области ВУФ. В главе 4 экспериментально показано, что в области ВУФ интенсивность ОПИ выше, чем в оптической области.

Стр. 106. Увы, простота диагностики при измерениях на пределе ее возможностей как всегда приводит к необходимости очень аккуратной и непростой обработки полученных данных. В связи с этим особенно важно было иметь представление об аппаратной функции объектива Шварцшильда, поскольку регистрируемое изображение есть результат свертки истинного профиля с этой функцией. Из описания эксперимента можно сделать вывод, что измерения ОПИ в оптической области спектра рассматривались как этап отладки и юстировки диагностики, иначе неясно, почему в оптической схеме отсутствует поляризатор.

Стр. 109. На мой взгляд, первое, что нужно было сделать автору, это объяснить причину несимметричности зарегистрированного профиля изображения пучка в эксперименте по регистрации обратного переходного излучения. Для аппроксимации модельной функцией была выбрана координата, где сечение симметрично. А как быть с остальной частью распределения? Непонятно, как проводилась аппроксимация для асимметричных профилей (рис. 3.14)? Следовало также описать процедуру определения и вычитания фона в зарегистрированном изображении.

Если сравнивать результаты обеих диагностик, то приходится сделать однозначный вывод, что применение сцинтиллятора неизмеримо проще и с точки зрения экспериментальной реализации, и с точки зрения интерпретации полученных результатов. Поэтому, на мой взгляд, можно сказать, что методу регистрации ОПИ для измерения размеров микронных пучков еще предстоит долгий путь, прежде чем он станет «рабочей лошадкой» в ускорительной физике. Утверждение, сделанное автором на стр. 121, «...считаю, что использование предложенной функции аппроксимации позволяет существенно повысить точность измерения вертикального размера пучка за счёт использования набора вертикальных проекций по сравнению со случаем использования одного центрального сечения» на мой взгляд, неточно. Предложенный метод обработки позволяет достовернее оценить погрешность измерений этим методом. Следовало бы усреднить величины, представленные на рис. 3.20 и посчитать $RMS \text{ у } \sigma_{yfit} \approx 1,8 \text{ мкм}$. Мне кажется, что полученная величина будет не меньше 0.8 мкм.

Стр. 132. Экспериментальные результаты приведены и сравниваются без ошибок измерений, что недопустимо.

Стр. 133. «Показано, что визуализация обратного переходного излучения, имеющего достаточно узкое угловое распределение приводит к тому, что объектив Шварцшильда использует не всю свою числовую апертуру» - на мой взгляд, это утверждение не нуждается в доказательствах.

Теоретические положения и экспериментальные результаты, представленные в Главе 4, выглядят убедительно. Впервые в мире автору удалось измерить вертикальный размер пучка с помощью обратного переходного излучения в диапазоне вакуумного ультрафиолета. Однако вертикальный размер электронного пучка, измерявшегося в эксперименте, составлял 12-14 мкм (RMS). Поэтому, к сожалению, автору не удалось продемонстрировать в полной мере преимущество перехода в этот спектральный диапазон для диагностики поперечного размера пучка. Насколько можно понять из приведенной хронологии, это планировалось сделать в серии экспериментов с объективом Шварцшильда, но там ОПИ в ВУФ диапазоне зарегистрировать не удалось. Поэтому вывод, что «Визуализация обратного переходного излучения в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета является очень перспективной методикой для измерения пучков с размером порядка $\sigma_y \approx 100$ нм» еще нуждается в экспериментальном обосновании. Однако диссертация Л. Г. Сухих вносит большой вклад в развитие этого метода диагностики пучков в ускорителях.

Дополнительно, можно сделать несколько замечаний по оформлению текста. Диссертация в целом написана хорошим языком и легко читается, однако превосходные степени в разделе «Выводы», и не только в нем, кажутся излишними. Красивые изображения на рис. 2.8. позволяют понять, что SPF зависит от величины Δa , но сечения распределений были бы, на мой взгляд, информативнее. Во всяком случае, следовало привести цветовую шкалу интенсивности, и не только на этом рисунке. На мой взгляд, лучше писать «рисунок взят» вместо «перерисован». Тексте диссертации содержит опечатки и орфографические ошибки. Отмечу некоторые из них. Например, “And” на стр. 67, видимо, осталось из оригинальной работы, написанной на английском языке. Используемые на стр. 49 и стр. 155 аббревиатуры СКО и ПШПВ не расшифрованы, и лучше было бы вместо них употребить RMS и FWHM. На стр. 88 в третьей строчке сверху есть лишнее «в».

Заключение

Сделанные замечания не снижают ценности диссертации. Результаты диссертационной работы Л. Г. Сухих широко известны научной общественности и опубликованы в ведущих журналах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Полученные результаты находятся на высоком научном уровне, экспериментальные исследования проведены в крупном научно-исследовательском центре

Считаю, что диссертационная работа актуальна, обладает достаточной научной новизной, представляет научный и практический интерес, полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям. Автор диссертации Л. Г. Сухих заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01. 04. 20. – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук

зав. сектора ИЯФ СО РАН

О. И. Мешков

22 мая 2018 года

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

тел. +7-913-953-92-81

e-mail: O.I.Meshkov@inp.nsk.su

Подпись О. И. Мешкова заверяю

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН

кандидат-физико-математических наук

Я.В. Ракшун