



УТВЕРЖДАЮ:

И.о. проректора по научной
работе и инновациям, К.Х.Н.

Оствальд Р.В.

« 19 » 19 декабря 2017 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

Диссертация «Измерение размеров микронных электронных пучков высокой энергии на основе переходного излучения»

выполнена на кафедре Прикладной физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Сухих Леонид Григорьевич

обучался в докторантуре Томского политехнического университета, работал в должности инженера-проектировщика, научного сотрудника, инженера-исследователя и доцента кафедры Прикладной физики ФГАОУ ВО НИ ТПУ.

В 2007 г. окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский политехнический университет» по специальности «Физика атомного ядра и частиц».

2 декабря 2009 г. защитил диссертацию «Фокусировка переходного и дифракционного излучения изогнутыми мишенями» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника» в диссертационном совете Д 212.269.05 при Томском политехническом университете.

Диплом кандидата физико-математических наук ДКН 110709 выдан решением Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации от 21 мая 2010 года № 20к/20.

Научный консультант – Потылицын Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры Прикладной физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность диссертационной работы.

В настоящее время в мире успешно эксплуатируется Большой Адронный Коллайдер, на котором уже был обнаружен бозон Хиггса и проходят дальнейшие исследования по поиску явлений «новой физики». Несмотря на то, что с обнаружением бозона Хиггса найдены все «ингредиенты» стандартной модели, остается ещё целый ряд нерешённых проблем, к которым относятся вопросы тёмной материи, (в Стандартной модели нет подходящего кандидата на эту роль), единственность бозона Хиггса и его элементарность. Для нахождения новых частиц за пределами Стандартной модели и для детального исследования свойств бозона Хиггса и t-кварка может быть построен новый электрон-позитронный линейный коллайдер.

Для эффективной работы коллайдера необходимо поддерживать высокую светимость в месте встречи. Для этого эмиттанс пучка должен измеряться и контролироваться на протяжении всего цикла ускорения. В случае проекта CLiC планируется создание примерно 800 станций измерения поперечного размера пучка, из которых 130 станций с пространственным разрешением 1 мкм (!). При этом энергия электронного и позитронного пучка изменяется в диапазоне 2,86 ГэВ до 1500 ГэВ. В настоящее время не существует готовых решений для создания станций мониторинга поперечного размера пучка линейного ускорителя с таким разрешением.

Стандартным механизмом для визуализации поперечного профиля электронного пучка является механизм обратного переходного излучения, которое является одним из частных случаев поляризационного излучения. Развитие физики и техники ускорения электронных пучков привело к тому, 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. В случаях, когда поперечные или продольные размеры электронных сгустков (микросгустков) сопоставимы по порядку величины с длиной волны, используемой в мониторе, наблюдаются существенные искажения получаемых изображений пучка.

Актуальность настоящей работы связана с необходимостью совершенствования мониторов поперечного профиля (размера) электронного пучка с целью повышения их разрешающей способности на основе обратного переходного излучения в видимом диапазоне за дифракционным пределом и в спектральной области вакуумного ультрафиолета.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Был разработан подход к расчёту изображений пучка от наклонных мишеней. Были получены результаты теоретического моделирования 3D изображений

пучка от наклонной мишенью, где впервые в мире теоретически продемонстрирован и объяснен эффект глубины фокуса при визуализации обратного переходного излучения. Разработанный подход позволяет получать изображения пучка как для σ - и π -компонент поляризации излучения, так и для неполяризованного излучения.

2. Была разработана универсальная функция аппроксимации вертикальной проекции изображения пучка, полученного с использованием σ -компоненты излучения, которая позволяет определить размер пучка как в случае двугорбого распределения (существенное влияние SPF), так и в случаях, когда влияние SPF меньше, т.е. распределение по-прежнему одnogорбое, но не Гауссово.
3. Впервые в мире были проведены экспериментальные исследования по визуализации поперечного профиля электронного пучка микрометровых размеров с использованием двухзеркального объектива Шварцшильда в видимом диапазоне длин волн. Поперечный профиль электронного пучка с вертикальным размером $\sigma_y \approx 1,5$ мкм был визуализирован как с помощью обратного переходного излучения, так и с помощью излучения тонкого сцинтиллятора. Анализ изображений пучка, полученных на основе обратного переходного излучения, показал, что разработанная функция аппроксимации вполне эффективна. Также было показано, что использование объектива Шварцшильда для визуализации обратного переходного излучения имеет ряд преимуществ, таких как отсутствующая хроматическая aberrация, так и ряд сложностей, например, нет ясности с эффективной числовой апертурой объектива при использовании узконаправленного излучения.
4. Впервые в мире были экспериментально получены двумерные изображения пространственного распределения обратного переходного излучения в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета ($\lambda \approx 20$ нм).
5. Впервые в мире были получены изображения электронного пучка с использованием обратного переходного излучения в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета ($\lambda \approx 20$ нм). Визуализация обратного переходного излучения проходила с использованием сферического многослойного зеркала, что позволило для одной и той же экспериментальной установки получить изображения в спектральных диапазонах вакуумного ультрафиолета и видимого света, напрямую сравнить их и объяснить имеющиеся различия с использованием разработанной теоретической модели.

Научная и практическая и ценность заключается в том, что

полученные теоретические модели и экспериментальные данные закладывают научно-технические основы для создания нового поколения мониторов по диагностике поперечного профиля электронного пучка с субмикрометровым разрешением. Разработанные теоретические модели позволяют рассчитывать

ожидаемые изображения пучка с учётом неидеальной фокусировки оптической системы, а также проводить анализ экспериментально получаемых изображений пучка даже по единственному изображению без проведения сложных процедур калибровки. Полученные экспериментальные результаты показывают, что возможно использование двухзеркальных микроскопических объективов с большим коэффициентом увеличения оптической системы (объектив Шварцшильда) для получения изображений пучка. Показана 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 $\sigma \approx 50$ нм.

Личный вклад автора состоит в выборе направления проведения исследований, разработке теоретических подходов и проведении теоретических расчётов, планировании и подготовке экспериментальных исследований, участии во всех экспериментальных исследованиях, обработке и анализе экспериментальных данных, подготовке и написании статей. Совместно с А.П. Потылицыным было изначально сформулировано направление развития исследований в область обратного переходного излучения в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета. Экспериментальные исследования проводились на разрезном микротроне MAMI-B (Институт ядерной физики университета Гутенберга, г. Майнц, Германия) с энергией пучка $E_e = 855$ МэВ. Экспериментальная работа была проведена в сотрудничестве автора данной работы, А.П. Потылицына – ведущего научного сотрудника ТПУ и научного консультанта данной диссертации, Геро Кубе (Gero Kube) – сотрудника научно-исследовательского центра «Немецкий электронный синхротрон DESY» (г. Гамбург, Германия), и Вернера Лаута (Werner Lauth) – сотрудника Института ядерной физики университета Гутенберга, (г. Майнц, Германия). Анализ поперечного размера пучка, полученного на основе измерения с помощью сцинтиллятора, выполнен Г. Кубе. Объектив Шварцшильда был разработан и изготовлен в Физическом институте Академии Наук имени П.В. Лебедева (г. Москва) и любезно предоставлен И.А. Артюковым. Многослойное сферическое зеркало было изготовлено и испытано Сашей Байт (Sasa Bajt) – сотрудницей научно-исследовательского центра «Немецкий электронный синхротрон DESY» (г. Гамбург, Германия). Проведение экспериментальных исследований на ускорителе MAMI-B проходило при участии и технической помощи аспирантов и сотрудников Томского политехнического университета Ю.А. Попова, А.В. Вуколова и А.И. Новокшенова. Теоретические расчёты характеристик обратного переходного излучения и экспериментальная верификация части общих положений (эффекты предволновой зоны, расчёт характеристик излучения в области вакуумного ультрафиолета и др.) проводились в Томском политехническом университете при участии Г.А. Науменко, С.Р. Углова и С.Ю. Гоголева.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечиваются прежде всего, использованием моделей, справедливость которых подтверждена в ряде экспериментальных работ и согласием представленных результатов экспериментальных исследований с теоретическими оценками. В некоторых случаях различия между экспериментом и теорией были в пределах применяемых допущений и не несли искажения физического смысла полученных результатов.

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались на семинарах Инновационной международной научно-образовательной лаборатории «Фотон» кафедры прикладной физики ТПУ, семинарах кафедры 67 Национального ядерного университета «МИФИ», лаборатории MDI, DESY (г. Гамбург, Германия), а также докладывались на международных конференциях и симпозиумах:

1. на международных симпозиумах «Radiation from relativistic electrons in periodical structures, RREPS» (2007, Прага, Чехия; 2009, Звенигород, Московская обл. Россия; 2013, Ереван, Армения; 2015, С.-Петербург, Россия);
2. на первой международной конференции «Technology and Instrumentation in Particle Physics, TIPP» (Цукуба, Япония, 2009);
3. на втором конгрессе «EUV and X-Ray Optics: Synergy between Laboratory and Space» (2011, Прага, Чехия);
4. на восьмой и десятой европейской конференции «Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, DIPAC» (2007, Венеция, Италия; 2011, Гамбург, Германия);
5. на третьей – шестой международной конференции «International Particle Accelerator Conference, IPAC» (2012, Новый Орлеан, Луизиана, США; 2013, Шанхай, Китай; 2014, Дрезден, Германия; 2015, Ричмонд, Вайоминг, США)
6. Международной конференции «International Beam Instrumentation Conference, IBIC» (2015, Мельбурн, Австралия)

Список публикаций по теме диссертации

1. **Сухих Л.Г.** Измерение угловых характеристик переходного излучения в ближней и дальней волновых зонах / Б.Н. Калинин, ... Л.Г. Сухих [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т. 84, № 3. – С. 136—140.
2. **Sukhikh L.** Angular distribution of coherent transition radiation from 6 MeV electron beam / V. Cha, ... L. Sukhikh. [et al.] // Proceedings of SPIE. Т. 6634. – 2007. – С. 663416.
3. **Sukhikh L.** Focusing of optical transition and diffraction radiation by a spherical target / L. Sukhikh [et al.] // Proceedings of 8th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, DIPAC 2007. – 2007. – С. 259-261.
4. **Sukhikh L.** Focusing of transition radiation from a paraboloidal target / G. Naumenko, ... L. Sukhikh. [et al.]// Nuclear Instruments and Methods in Physics

Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2008. – Т. 266, № 17. – С. 3733-3737.

5. **Sukhikh L.** Observation of focusing effect in optical transition and diffraction radiation generated from a spherical target / L. Sukhikh [et al.] // *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*. – 2009. – Т. 12, № 7. – С. 071001.
6. **Сухих Л.Г.** Обратное переходное излучение релятивистских частиц в области вакуумного ультрафиолета как возможное средство для диагностики пучков / Гоголев С.Ю., Сухих Л.Г., Потылицын А.П. // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 315, № 2. – С. 62-66.
7. **Sukhikh L.** Macroscopic effect of the shadow of the electromagnetic field of relativistic electrons / G. Naumenko, ... L. Sukhikh. [et al.] // *JETP Letters*. – 2009. – Т. 90, № 2. – С. 96-101.
8. **Sukhikh L.** Backward transition radiation in EUV-region as a possible tool for beam diagnostics / Sukhikh L., Gogolev S., Potylitsyn A. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2010. – Т. 623, № 1. – С. 567-569.
9. **Sukhikh L.** Backward transition radiation in EUV-region as a possible tool for beam diagnostics / Sukhikh L., Gogolev S., Potylitsyn A. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2010. – Т. 236. – С. 012011.
10. **Sukhikh L.** «Shadowing» of the electromagnetic field of relativistic charged particles / G. Naumenko, ... L. Sukhikh. [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2010. – Т. 236. – С. 012004.
11. **Sukhikh L.** Investigation of the surface current excitation by a relativistic electron electromagnetic field / G. Naumenko, ... L. Sukhikh. [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2010. – Т. 236.
12. **Sukhikh L.** Development of microwave and soft X-ray sources based on coherent radiation and Thomson scattering / A. Aryshev, ... L. Sukhikh. [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2010. – Т. 236.
13. **Sukhikh L.** A compact soft X-ray source based on Thomson scattering of Coherent Diffraction Radiation / A. Aryshev, ... L. Sukhikh. [et al.] // *Proceedings of IPAC 2010 - 1st International Particle Accelerator Conference*. – 2010. – С. 196-198.
14. **Сухих Л.Г.** Исследование динамики электромагнитного поля релятивистских электронов при взаимодействии с мишенями / Г. Науменко, ... Сухих Л. [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2010. – 10-2. – С. 161-166.
15. **Сухих Л.Г.** Экспериментальное исследование возбуждения поверхностных токов полем релятивистских электронов / Г. Науменко, ... Сухих Л. [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2010. – 10-2. – С. 167-172.
16. **Сухих Л.Г.** Исследование динамики поля релятивистских электронов, рассеянных магнитным диполем / Г. Науменко, ... Сухих Л. [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2010. – 10-2. – С. 173-177.

17. **Sukhikh L.** Experimental investigations of backward transition radiation characteristics in extreme ultraviolet region / L. Sukhikh [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. T. 8076. – 2011. – 80760G.
18. **Sukhikh L.** Experimental investigations of backward transition radiation from flat target in extreme ultraviolet region / L. Sukhikh [et al.] // Proceedings of the 10th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, DIPAC-2011. – 2011. – C. 544-546.
19. **Sukhikh L.** Electromagnetic field features at interaction of relativistic electron with matter / G. Naumenko, ... L. Sukhikh. [et al.] // Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C. – 2011. – T. 34, № 4. – C. 285-295.
20. **Sukhikh L.** Transition radiation from a cylindrical target and transverse beam size diagnostics / Potylitsyn A., Sukhikh L. // Proceedings of DIPAC 2011 - Proceedings of the 10th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators. – 2011. – C. 410-412.
21. **Sukhikh L.** Beam profile imaging based on backward transition radiation in the extreme ultraviolet region / L. Sukhikh [et al.] // Proceedings of IPAC 2012 - International Particle Accelerator Conference 2012. – 2012. – C. 819-821.
22. **Sukhikh L.** Transverse beam profile diagnostics using point spread function dominated imaging with dedicated de-focusing / G. Kube, ... L. Sukhikh [et al.] // Proceedings of IPAC 2013: Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference. – 2013. – C. 488-490.
23. **Сухих Л.Г.** Исследование ВУФ-излучения, генерируемого электронами с энергией 5,7 МэВ при взаимодействии с периодической структурой многослойного рентгеновского зеркала / Углов С.Р., ... Сухих Л.Г. [и др.] // Известия Высших Учебных Заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, 11-2. – С. 219-224.
24. **Sukhikh L.** Backward transition radiation in the extreme ultraviolet region as a tool for the transverse beam profile diagnostic / L. Sukhikh [et al.] // Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams. – 2014. – T. 17, № 11. – C. 112805.
25. **Sukhikh L.** EUV radiation generated by 5.7 mev electron beam in multilayer periodical structure / S. Uglov, ... L. Sukhikh [et al.] // Proceedings of IPAC 2014: Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference. – 2014. – C. 3503-3505.
26. **Sukhikh L.** Investigation of the characteristics of EUV backward transition radiation generated by 5.7 MeV electrons in mono- and multilayer targets / S. Uglov, ... L. Sukhikh [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – T. 517, № 1. – C. 012009.
27. **Sukhikh L.** Observation of quasimonochromatic radiation in the vacuum ultraviolet region generated by 5.7-MeV electrons in a multilayer mirror / S. Uglov, ... L. Sukhikh [et al.] // JETP Letters. – 2014. – T. 100, № 8. – C. 503–507.

28. **Sukhikh L.** Observation of subterahertz monochromatic transition radiation from a grating / A. Potylitsyn, ... L. Sukhikh [et al.]// JETP Letters. – 2016. – Т. 104, №11. – С. 806-810.
29. **Sukhikh L.** Simulation of transition radiation based beam imaging from tilted targets / Sukhikh L. G., Kube G., Potylitsyn A. P. // Physical Review Accelerators and Beams. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 032802.
30. **Sukhikh L.** Monochromatic coherent grating transition radiation in sub-THz frequency range / G. Naumenko ... L. Sukhikh [et al.]// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2017. – Т. 402. – С. 153-156.
31. **Sukhikh L.** Observation of soft X-ray Cherenkov radiation in Al / S. Uglov, ... L. Sukhikh [et al.]// EPL. – 2017. – Т. 118, № 3. – С. 34002.

Диссертация «Измерение размеров микронных электронных пучков высокой энергии на основе переходного излучения»

Сухих Леонида Григорьевича

рекомендуется к защите на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности

01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Заключение принято на заседании кафедры Прикладной физики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Присутствовало на заседании 24 чел. Результаты голосования: «за» – 24 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 31 от «04» декабря 2017 г.

Председатель научного семинара
кафедры Прикладной физики
Трясучев В.А., д.ф.-м.н., профессор