

На правах рукописи



ДОРОХОВ ВИКТОР ЛЕОНИДОВИЧ

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ
ДИАГНОСТИКИ В ЦИКЛИЧЕСКИХ
УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

МЕШКОВ — доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Олег Игоревич Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

БОЙКО — доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Виктор Михайлович Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, заведующий лабораторией

СУХИХ — доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, проректор по академическому превосходству Томского политехнического университета

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Международная межправительственная организация «Объединённый институт ядерных исследований», г. Дубна

Защита состоится «18» мая 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН* и по адресу:

https://inp.nsk.su/images/diss/Dorokhov_VL_disser.pdf.

Автореферат разослан «22» марта 2021 г.
Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук



А.В. Бурдаков

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Важным инструментом изучения различных процессов и явлений в физике давно стали ускорители заряженных частиц. Ярким примером этому служат циклические ускорители — источники синхротронного излучения (СИ), являющиеся одним из важнейших инструментов, определяющих темпы развития многих наукоёмких отраслей, таких, как: нанотехнологии, медицина, материаловедение, биология. Постоянное развитие современной техники приводит к необходимости покорения новых, недоступных вчера, вершин ускорительной техники, предъявляя всё более жесткие требования к параметрам пучка. На этом фоне естественно появление новых требований и к инструментам, обеспечивающим наблюдение и измерение параметров пучка частиц в этих установках. Прежде всего это связано с необходимостью выявления отклонений параметров пучка от проектных, что позволяет обеспечить его требуемое качество, напрямую влияющее на эффективность эксплуатации установки, количество и надёжность проведенных исследований.

Экспериментальные исследования в области динамики пучка на действующих установках позволяют нащупать пределы их возможностей и оценить перспективы модернизации, а полученные результаты служат фундаментом при разработке новых ускорительных комплексов и установок. Естественным является то, что необходимость изучения особенностей динамики пучка делает предельно важным наблюдение более тонких эффектов, а это, в свою очередь, налагает более жесткие требования на чувствительность средств регистрации.

Таким образом, развитие диагностики пучка необходимо для обеспечения эффективности эксплуатации установки и позволяет гарантировать появление инструментов, способствующих дальнейшему развитию ускорительной техники. Также является разумным совершенствование диагностик на действующих машинах, чтобы будущие установки были обеспечены надёжными средствами наблюдения параметров пучка.

Датчики, применяемые для диагностики пучков в циклических ускорителях заряженных частиц можно разделить на три группы [16; 17]: контактные, оптические и электромагнитные. Первая группа датчиков названа контактной

из-за принципа работы, подразумевающего взаимодействие тела датчика с исследуемым пучком, что, как правило, приводит к значительным потерям частиц пучка, поэтому эту диагностику ещё называют разрушающей. Понятно, что такие датчики не могут работать в непрерывном режиме ввиду разрушающего воздействия на пучок, тем не менее контактные методы диагностики регулярно используются во время отладки установки или её ввода в эксплуатацию. Использование контактных датчиков значительно упрощает настройку установки, в частности, это относится к режиму инъекции и проводки пучка до замыкания первого оборота в кольце накопителя. К наиболее часто используемым контактным датчикам можно смело отнести люминофорные экраны. Без этих инструментов диагностики пучка не обходится практически ни одна ускорительная установка, что обусловлено дешевизной, простотой, эффективностью и надежностью такой методики измерений. Люминофорные датчики условно можно отнести и к оптической диагностике ввиду принципа их работы, в основе которого лежит регистрация распределения плотности заряда в пучке по свечению взаимодействующего с этим пучком люминофора. Метод измерения параметров пучка с помощью оптических и электромагнитных датчиков относится к неразрушающим [17; 18], то есть значительного воздействия на частицы пучка не происходит. Это позволяет производить наблюдения и измерения в непрерывном режиме во время эксплуатации установки на пользователей.

Традиционно в группу оптических относят датчики, регистрирующие синхротронное излучение из поворотных магнитов или других устройств генерации (вигглеров или ондуляторов). Бесконтактность – их естественное огромное преимущество. Как правило, в циклических ускорителях имеются места вывода СИ из магнитных элементов кольца накопителя, которые могут использоваться для оптической диагностики. Это исключает необходимость установки дополнительных устройств в вакуумной камере и является значительным достоинством оптических методов диагностики. Современная элементная база и приборы регистрации излучения, обладающие высокой чувствительностью, временным и пространственным разрешением, позволяют создавать оптические датчики, способные охватить широкий круг существующих диагностических задач: от точных измерений всех пространственных размеров пучка до иссле-

дования его профиля с однооборотным временным разрешением. Кроме того, существует возможность исследования как дипольных, так и квадрупольных колебаний пучка по всем трем пространственным координатам.

Цели и задачи диссертационной работы:

Основными целями данной работы являлись:

1. Ввод в строй новой станции оптического наблюдения накопителя «Сибирь-2» Курчатовского специализированного источника синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов» с целью обеспечить ускоритель набором современных инструментов диагностики пучков заряженных частиц [19; 20; 1–3].

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Произведен расчет необходимых параметров оптической системы основных элементов, входящих в состав комплекса оптической диагностики;
 - Осуществлена сборка вакуумного канала вывода СИ за стену биозащиты накопителя «Сибирь-2». Проведена юстировка канала и получен пучок излучения на месте монтажа стола оптической диагностики;
 - Произведен монтаж стола оптической диагностики на станции. Осуществлена установка и юстировка элементов оптической диагностики;
 - Подготовлен пакет программного обеспечения для работы с оптическими датчиками и элементами управления интенсивностью пучка СИ;
 - Осуществлена калибровка элементов оптической диагностики. Проведены измерения параметров пучка с помощью всех каналов, входящих в состав диагностического комплекса.
2. Исследование возможностей модели диссектора, разработанного на основе электронно-оптического преобразователя (ЭОП) ПИФ-01 [4; 21; 5; 6; 22; 7; 8]. Достижение временного разрешения порядка единиц пикосекунд. Применение нового диссектора на действующих установках [9].

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- В [Институте общей физики им. А.М. Прохорова \(ИОФ\)](#) собран стенд калибровки нового диссектора;
 - Проведены измерения временного разрешения нового диссектора с использованием серии образцов разработанного ЭОП. Получено временное разрешение в пределах $1.75 \div 3$ *нс* для серии испытанных ЭОП;
 - Осуществлены измерения параметров пучка электронов на источнике СИ [Metrology Light Source \(MLS\)](#) (Берлин, Германия). Проведено сравнение временного разрешения диссектора и стрик-камеры производства [Hamamatsu Photonics](#).
3. Исследование и сравнение зависимости светового выхода от плотности заряда в пучке различных люминофорных экранов с целью обеспечения возможности оценки перспектив использования изученных материалов в люминофорных датчиках.

Для достижения поставленной цели были проведены измерения на специализированном экспериментальном стенде светового выхода люминофорных экранов под воздействием электронного и позитронного пучков [10].

4. Исследование продольного профиля распределения пучка в линейном ускорителе [инжекционного комплекса \(ИК\) Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН \(ИЯФ\)](#) (Новосибирск) с помощью регистрации черенковского излучения стрик-камерой PS-1/S1 [11; 23; 24].

Научная новизна

1. Спроектирован, изготовлен и введен в эксплуатацию профилометр на основе массива лавинных фотодиодов. Прибор стал следующей, значительно улучшенной, версией разработанного в ИЯФ быстрого профилометра на основе многоанодного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) [25] и значительно превосходит его по параметрам [19; 3]. Профилометр является уникальной разработкой и до недавнего времени не имел аналогов в мире.

2. Впервые в России на источнике СИ использован двухщелевой интерферометр для измерения поперечного размера пучка частиц в качестве регулярной диагностики [19; 2].
3. Совместно с отделом фотоэлектроники ИОФ им. А.М. Прохорова создан электронно-оптический диссектор нового поколения, временное разрешение которого превосходит 2 пс [4; 8]. Новый диссектор впервые применен на ускорительной установке Metrology Light Source [9]. Это устройство обладает рекордным значением временного разрешения при своей надежности и не имеет аналогов в мире.

Теоретическая и практическая значимость

Новый комплекс оптической диагностики источника синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов» (Москва) успешно введен в эксплуатацию и предоставляет необходимый арсенал современных диагностических инструментов, давая информацию о параметрах пучка как во время стандартной работы на пользователей, так и во время проведения экспериментов по изучению динамики пучка.

Два экземпляра разработанного в ИЯФ прибора пооборотной регистрации поперечного профиля пучка (профилометр на основе массива лавинных фотодиодов) включены в состав оптической диагностики ускорительного комплекса «КИСИ-Курчатов». С помощью обоих приборов произведено наблюдение за пучком частиц. Аналог этого прибора вошел в комплекс диагностики коллайдера [ВЭПП-2000](#) (ИЯФ СО РАН).

Разработана, испытана и применена на действующей установке новая модель диссектора. Временное разрешение этого прибора было значительно улучшено по сравнению с предыдущей моделью ЛИ-602, и отвечает современным требованиям, предъявляемым к этой диагностике. Это позволяет с успехом использовать его в составе модернизированных или новых систем наблюдения за пучком.

Результаты измерений светового выхода люминофоров, приведенные в работе, были использованы при проектировании люминофорных датчиков бустера источника синхротронного излучения [National Synchrotron Light Source II](#) (NSLS-II, США) [26], а также могут быть учтены при модификации подобной

диагностики на действующих установках и при проектировании будущих как в России, так и за рубежом. Конструкция этих датчиков, с учетом особенностей эксплуатации, будет повторена в диагностическом комплексе бустера источника СИ СКИФ.

Исследована продольная структура пучка электронов в линейном ускорителе инжекционного комплекса ИЯФ. Наблюдения, проведённые с помощью стрик-камеры PS-1/S1, помогли оптимизировать режим работы линейного ускорителя [24]. Камера продемонстрировала универсальность и высокую надежность при работе в условиях высокого уровня электромагнитных помех и радиационного фона, что показало широкие возможности для её использования на ускорительных установках ИЯФ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Продemonстрировано, что разработанная и введенная в строй система оптической диагностики источника СИ «КИСИ-Курчатов», способна обеспечивать комплекс информацией о требуемых параметрах пучка с необходимой точностью.
2. Показана возможность достижения временного разрешения в пределах единиц пикосекунд с помощью диссектора, созданного на основе разработанного в ИОФ РАН электронно-оптического преобразователя ПИФ-01, что подтверждено прямыми измерениями на специально подготовленном стенде в ИОФ. Продemonстрирована функциональность новой модели диссектора на источнике СИ Metrology Light Source (MLS, Берлин).
3. Проведено исследование зависимости светового выхода от плотности заряда в пучке для ряда люминофорных экранов, изготовленных из различных люминесцентных материалов. Показано, что эти характеристики линейны в области плотностей заряда вплоть до $1.5 \cdot 10^{10} e^- / \text{см}^2$ для энергии электронов 354 МэВ и до плотностей заряда $10^{11} n_e / \text{см}^2$ при энергии электронов 1825 МэВ .
4. Показано, что стрик-камера в комплексе с датчиком на основе излучения Вавилова-Черенкова является эффективным средством исследования структуры пучка в линейном ускорителе.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты работ, положенных в основу диссертации, докладывались на следующих конференциях:

- The 10th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (DIPAC2011), май 2011 года, Гамбург, Германия;
- The 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC2014), июнь 2014 года, Дрезден, Германия;
- The 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC2016), май 2016 года, Пусан, Корея;
- The 5th International Beam Instrumentation Conference (IBIC2016), сентябрь 2016 года, Барселона, Испания;
- The 8th International Particle Accelerator Conference (IPAC2017), июнь 2017 года, Копенгаген, Дания;
- XXV Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2016), ноябрь 2016 года, Санкт-Петербург, Россия;

О результатах работ, полученных на станции оптического наблюдения источника СИ «КИСИ-Курчатов», автор неоднократно докладывал во время выступлений на конкурсах молодых ученых ИЯФ СО РАН.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 15 работ в рецензируемых журналах и сборниках трудов конференций [1–15], 7 из которых изданы в журналах рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора

Автор осуществлял подготовку и проведение экспериментальных исследований, проводил разработку теоретических подходов к получению данных и осуществлению исследований. Производил обработку экспериментальных данных с помощью кода, основанного на разработанных им теоретических подходах и реализованного на языках Matlab, Mathcad и C++.

В составе команды ИЯФ СО РАН внес существенный вклад в процесс сборки, наладки, модернизации и ввода в эксплуатацию новой системы оптической

диагностики источника СИ «КИСИ-Курчатов». Автор разработал программное обеспечение элементов диагностики, с помощью которого проводились измерения поперечного и продольного распределения заряда в пучке накопителя «Сибирь-2» источника СИ «КИСИ-Курчатов» [19; 20; 1; 3].

Автор принимал активное участие в разработке и отладке системы оптической диагностики кольца накопителя охладителя (НО) инжекционного комплекса ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Проводил эксперименты по регистрации продольного распределения заряда в кольце НО и линейном ускорителе инжекционного комплекса ИЯФ с помощью диссектора и стрик-камеры [11; 12; 27; 28].

Являясь членом коллектива, осуществляющего усовершенствование и разработку нового диссектора, используемого для наблюдения за продольным распределением заряда в пучке накопителей заряженных частиц, принимал активное участие в подготовке и вводе в эксплуатацию стенда измерений его временного разрешения [6]. При непосредственном участии автора в экспериментах на разработанном стенде было получено временное разрешение диссектора лучше 2 пс .

Принимал активное участие в исследованиях сцинтилляционных материалов люминофорных экранов во время разработки люминофорных датчиков бустера источника СИ NSLS-II, получал и анализировал экспериментальные данные [10].

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из: введения; 3 глав; заключения; списка сокращений и условных обозначений; списка литературы; списка иллюстративного материала; списка таблиц. Общий объем работы 129 страниц, из них 107 страниц текста, включая 67 рисунков и 11 таблиц. Библиография включает 89 наименования на 12 страницах.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена бесконтактной диагностике пучка заряженных частиц в циклических ускорителях с использованием синхротронного излучения. Кратко рассматриваются свойства СИ, генерируемого в дипольном магните. Приводится описание нового комплекса оптической диагностики накопителя «Сибирь-2» и входящих в него приборов. Рассмотрены основные ограничения проекционной оптики, определяющие минимально видимый размер пучка посредством регистрации его изображения, связанные как с дифракционным пределом, так и с ненулевыми размерами области излучения, с которой собирается СИ. Из приведённых ограничений следует, что при имеющихся параметрах участка извлечения излучения на длине волны максимума чувствительности ПЗС-матрицы камеры ($\lambda_{\text{макс.}} \approx 550 \text{ мкм}$), минимальные размеры источника света (одного электрона), которые можно зарегистрировать с её помощью на станции оптической диагностики «Сибирь-2», составят:

$$d_{\text{рад.}} = \sqrt{d_{\text{arc}}^2 + d_{\text{diff}}^2 + d_{\text{depth}}^2} \approx \sqrt{22^2 + 23^2 + 44^2} \approx 54 \text{ мкм};$$
$$d_{\text{верт.}} = \sqrt{d_{\text{diff}}^2 + d_{\text{depth}}^2} \approx \sqrt{23^2 + 44^2} \approx 50 \text{ мкм}.$$

Здесь $d_{\text{рад.}}$ – минимальный видимый радиальный (горизонтальный) размер одного электрона; $d_{\text{верт.}}$ – минимальный видимый вертикальный размер; d_{arc} – горизонтальный видимый размер дуги траектории электрона; d_{depth} – ограничение глубины резкости, связанное с конечным продольным размером видимой

части дуги траектории частиц; d_{diff} – ограничение, накладываемое дифракционным пределом. Из приведённых значений и расчётных размеров пучка в месте излучения (таблица 1) видно, что с помощью одной только цифровой камеры получить истинный вертикальный размер не представляется возможным в видимом диапазоне длин волн. Однако, осуществлять измерения радиального размера и определять положение центра масс пучка камера может с успехом.

Таблица 1. Параметры накопителя «Сибирь-2» ускорительного комплекса «КИСИ-Курчатов» и характеристики электронного пучка в точке излучения используемой для системы оптической диагностики

Энергия, E , ГэВ	0.45 ÷ 2.5
Частота ускоряющего ВЧ, ν_{RF} , МГц	181.14
Периметр, C , м	124.13
Время жизни ($E = 2.5$ ГэВ), час.	10 ÷ 25
Частота обращения, МГц	2.415
Размеры банча, мм: $\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$ ($E=2.5$ ГэВ, $I_b = 1$ мА)	0.059, 0.45, 20
Длительность банча, нс: (ПШПВ $E = 2.5$ ГэВ, $I_b = 1$ мА)	0.16
Число электронов в одном банче при токе $I_b = 1$ мА	$2.6 \cdot 10^9$
Максимальный ток электронов, мА	
в одногустковом режиме	100
в многоструктурном режиме	300

Особое внимание уделяется интерферометру, включённому в диагностический комплекс для точного определения вертикального размера. Рассмотрены влияющие на его точность факторы, такие, как:

- отличие интенсивностей излучения, падающих на разные щели диафрагмы в силу особенностей диаграммы направленности СИ. Эта ситуация может возникнуть при смещении диафрагмы относительно плоскости орбиты пучка;
- возникновение дополнительной засветки щелей, светом не участвующим в интерференции. Может быть вызвано вредными отражениями от по-

верхности канала вывода СИ или оптических деталей диагностического комплекса.

Показано, что существенное влияние на видимый интерферометром размер оказывает посторонняя засветка щелей, вызванная светом, не участвующим в интерференции.

Описан новый быстрый профилометр на основе массива лавинных фотодиодов (МЛФД), приводится сравнение его параметров с аналогичным устройством предыдущей модели, используемым на коллайдере ВЭПП-4М (ИЯФ СО РАН) (таблица 2). Рассмотрены результаты регистрации поперечных профи-

Таблица 2. Основные параметры профилометров на основе массива лавинных фотодиодов *First Sensor AA16 – 0.13 – 9S0J22GL*. и многоанодного фотоэлектронного умножителя (МФЭУ)

Параметр	МЛФД	МФЭУ
Разрешение, <i>пиксел × пиксел</i>	1 × 16	
Частота регистрации кадров, <i>МГц</i>	36 или 45	10 ⁻⁵ – 1
Динамический диапазон, <i>бит</i>	12	
Объём памяти, <i>кадров</i>	≈ 15.6 <i>млн.</i>	≈ 131 <i>тыс.</i>
Скорость передачи кадров, <i>Мбит/сек.</i>	100	
Спектральный диапазон, <i>нм</i>	450 – 1000	300 – 650
Размеры прибора, <i>см</i>	10 × 10 × 40	10 × 10 × 25

лей распределения заряда, получаемые этим прибором (рисунок 1), и пример использования этих данных для анализа частот быстрых колебаний сгустков пучка (рисунок 2).

Глава содержит результаты измерения технической аппаратной функции диссектора – прибора используемого для наблюдения за продольным распределением заряда в пучке. Согласно этим измерениям, его техническая аппаратная функция составила $\sigma_{tex} = 12.2 \pm 0.2$ *нс*. Произведено сравнение измерений, полученных диссектором, со стрик-камерой PS-1/S1 производства ИОФ РАН, с помощью которого была оценена общая аппаратная функция, охватывающая влияние таких факторов, как размер пятна фокусировки излучения исследуемого источника, его дрожание и фазовая нестабильность сигнала синхронизации.

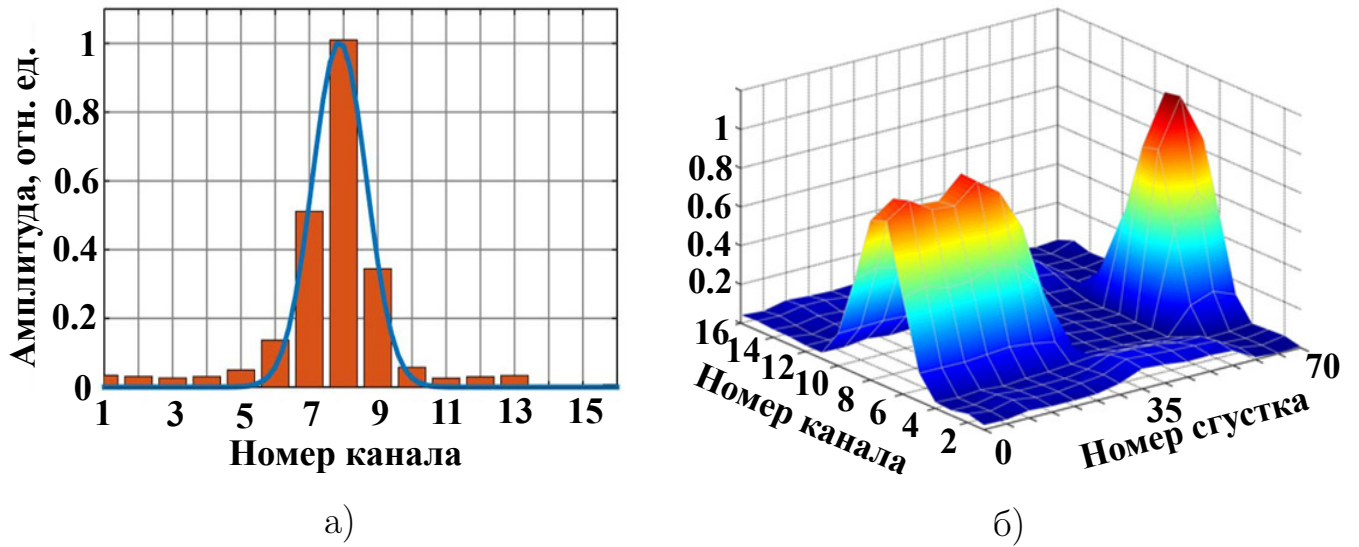


Рис. 1. (а) — Профиль электронного сгустка регистрируемый за один оборот профилометром на основе МЛФД. (б) — Вертикальное распределение заряда сгустков электронного пучка в кольце накопителя «Сибирь-2»

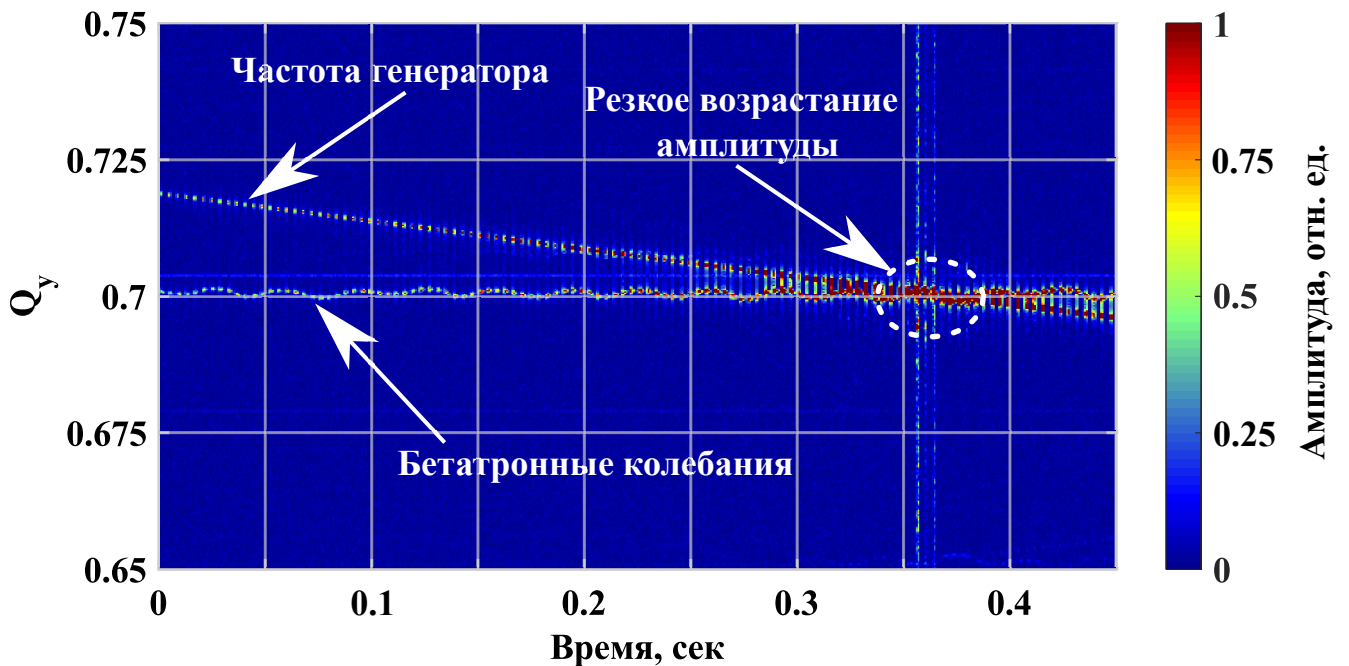


Рис. 2. Спектрограмма сигнала регистрируемого МЛФД на протяжении 450 мс в ходе измерений бетатронной частоты. Видна линейно меняющаяся гармоника воздействующего на пучок генератора и гармоника бетатронной частоты, амплитуда которой резко возрастает при совпадении с частотой возбуждения

Из зависимостей, представленных на рисунке 3, аппаратная функция диссектора определялась по выражению

$$\sigma_{ann} = \frac{\sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_{dissc|n}^2 - \sigma_{cmp|n}^2}}{N}, \quad (1)$$

где σ_{dissc} — размер пучка, видимый диссектором; σ_{cmp} — размер пучка, полученный из изображения, регистрируемого стрик-камерой. Величина аппаратной функции, вычисленная по приведённому выражению, составила $\sigma_{ann} = 44.8 \pm 0.9$ нс. Отсюда получена оценка вклада размеров пятна фокусировки излучения исследуемого источника, его дрожания и фазовой нестабильности

$$\sqrt{\sigma_{ann}^2 - \sigma_{mex}^2} = \sqrt{44.8^2 - 12.2^2} = 43.1 \pm 1.1 \text{ нс.}$$

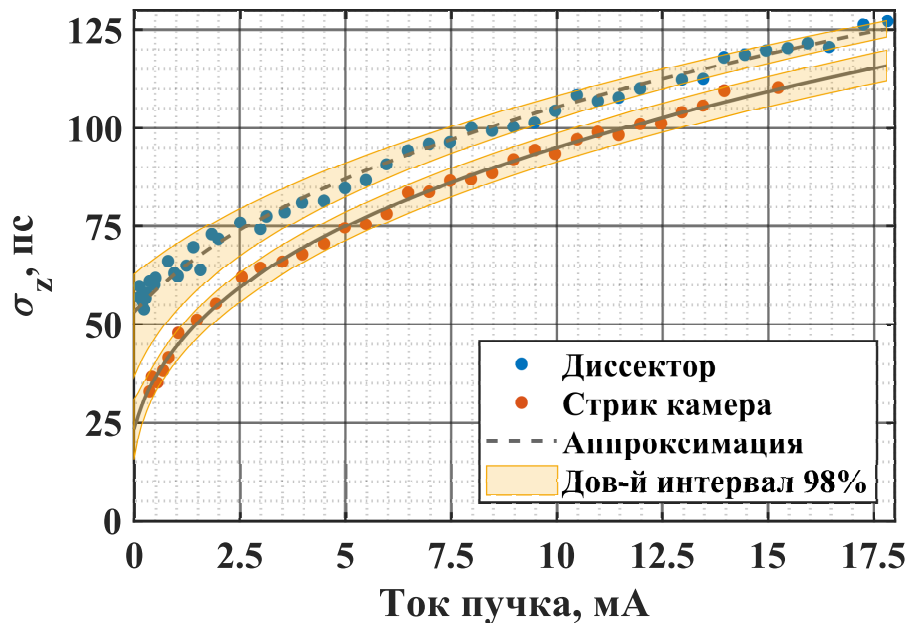


Рис. 3. Результаты измерений длины сгустка в кольце накопителя «Сибирь-2». Синие точки - получены диссектором; красные - стрик-камерой

Таким образом, несмотря на достаточно высокое значение суммарной аппаратной функции прибора, её постоянство, за исключением случая возникновения существенных когерентных колебаний, с хорошей точностью позволяет вычислять продольный размер пучка.

Результаты работы над описанным в главе диагностическим комплексом легли в основу статей, опубликованных в журнале Journal of Instrumentation [2],

трудах конференций The 5th International Beam Instrumentation Conference [1; 3] и The 5th International Particle Accelerator Conference [20].

Во второй главе описан хронографический метод регистрации, лежащий в основе идеи наблюдения продольного распределения заряда в пучке с помощью диссектора. Отмечено, что временного разрешения порядка $20 \div 30$ *нс* (ПШПВ), которое имеет устаревшая на данный момент модель диссектора ЛИ-602, повсеместно применяющаяся на ускорительных установках в России, недостаточно для надёжного наблюдения в современных машинах. Это вызвало необходимость разработки новой модели прибора, обеспечивающей временное разрешение на уровне единиц пикосекунд. Поэтому в ИЯФ СО РАН совместно с ИОФ им. А.М. Прохорова (Москва) была разработана новая модель диссектора [5; 6; 13] на основе электронно-оптического преобразователя (ЭОП) ПИФ-01, используемого в стрик-камерах производства ИОФ.

Временное разрешение диссектора, как величина технической аппаратной функции, является универсальной характеристикой прибора. Поэтому для точного определения разрешения устройства в ИОФ им. А.М. Прохорова РАН был собран калибровочный стенд на основе лазера с длительностью светового импульса 30 *фс*, которые с высокой точностью можно считать δ -импульсами по отношению к ожидаемому временному разрешению прибора ($\sim 1 \div 2$ *нс*). В главе приводится описание стенда калибровки и результатов измерения временного разрешения диссектора. Полученное на стенде временное разрешение диссектора составило ~ 3.5 *нс* (ПШПВ).

Важным этапом на пути внедрения этого устройства являются результаты измерений, произведённых на накопителе Metrology Light Source (MLS) в Национальном Институте Метрологии Германии (Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)). На MLS существует режим работы с малым коэффициентом уплотнения орбит — «low- α mode» [29—31]. В этом режиме длина сгустков имеет сильную зависимость от тока и может достигать нескольких пикосекунд, что позволило проверить способность нового диссектора регистрировать такие распределения. Диссектор и стрик-камера использовались для регистрации электронов в односгустковом режиме работы накопителя. Длина пучка с током 0.3 *мА*, при котором возможна надёжная работа стрик-камеры, менялась с помощью напряжения на ускоряющем резонаторе. Измеренные стрик-камерой и диссектором

зависимости представлены на рисунке 4. Во время экспериментов не удалось получить сгустки с размером менее 6 пс , однако результаты успешно продемонстрировали возможности нового диссектора и позволили оценить вклад размеров пятна фокусировки излучения исследуемого источника, его дрожания и фазовой нестабильности, ухудшающих аппаратную функцию прибора, составивший $\sim 2.8\text{ пс}$.

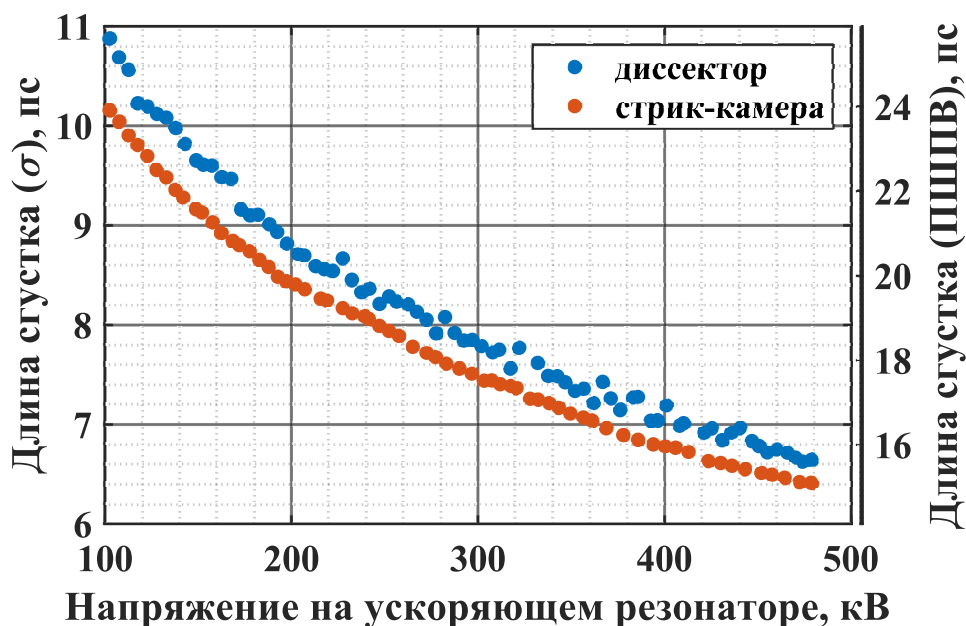


Рис. 4. Данные измерения длины пучка при помощи стрик-камеры и диссектора

Результаты второй главы легли в основу ряда статей [4; 21; 6; 22; 8; 14; 15; 32], представлены и опубликованы в трудах конференций (The 5th и 6th International Beam Instrumentation Conference [5; 9], Conference the International Society for Optical Engineering [13]).

Третья глава посвящена контактными оптическим датчикам. Первый параграф главы посвящён люминофорным датчикам как средству наблюдения поперечного распределения заряда в пучке. Во втором параграфе описываются наблюдения продольного распределения заряда в пучке по излучению Вавилова-Черенкова, генерируемого в кварцевом радиаторе.

В первом параграфе приводится краткий обзор люминофоров, используемых для регистрации заряженных частиц. Описана конструкция люминофорного датчика, разработанного для бустера источника СИ NSLS-II. Рассказывается об экспериментах по измерению светового выхода под воздействием пучка

электронов для ряда материалов. Описанные измерения вызваны отсутствием достоверной информации об этой характеристике для люминофоров, которые возможно использовать в этой диагностике. Приводятся данные, полученные для экранов на основе порошковых люминофоров (таблица 3) и ряда экранов на основе кристаллов (таблица 4).

Таблица 3. Цвет и длительность свечения исследованных порошковых люминофоров

Люминофор	Цвет свечения	Длительность свечения(10%),мкс
1.) $(ZnS, CdS) : Ag$	Зелёный	1250
2.) ZnS	Зелёный	1250
3.) $Gd_2O_2S : Eu$	Красный	250
4.) $Gd_2O_2S : Tb$	Зелёный	750
5.) $Y_2O_2S : Tb$	Синий	1000

Таблица 4. Длина волны максимума интенсивности и длительность свечения исследованных кристаллических люминофоров

Люминофор	Максимум интенсивности свечения, нм	Длительность свечения(10%),нс
1.) $CWO(CdWO_4)$	480	5 000
2.) $BGO(BiGeO_4)$	480	300
3.) $YAG : Ce(Y_3Al_5O_{12})$	550	70
4.) $ZWO(ZnWO_4)$	480	10 000 – 20 000
5.) Рубин $Al_2O_3 : Cr$	694	5 000

Основные результаты исследования получены как зависимости светового выхода люминофоров от заряда в пучке с энергией 354 МэВ (рисунок 5, рисунок 6) и ~ 1.8 ГэВ рисунок 7. В ходе измерений выяснилось, что под воздействием пучка электронов наибольшим световым выходом среди исследованных экранов на основе порошковых люминофоров обладает $(ZnS, CdS) : Ag$ (согласно данным ПЗС-камеры). Полученные зависимости светового выхода от плотности заряда ведут себя линейно вплоть до плотностей $1.5 \cdot 10^{10} e^-/cm^2$. Также, проводилась серия измерений светового выхода для частиц с энергией 1.8 ГэВ, но только с кристаллом $YAG : Ce$, который планировалось использовать в датчиках бустера NSLS-II, и наиболее эффективным, по полученным результатам,

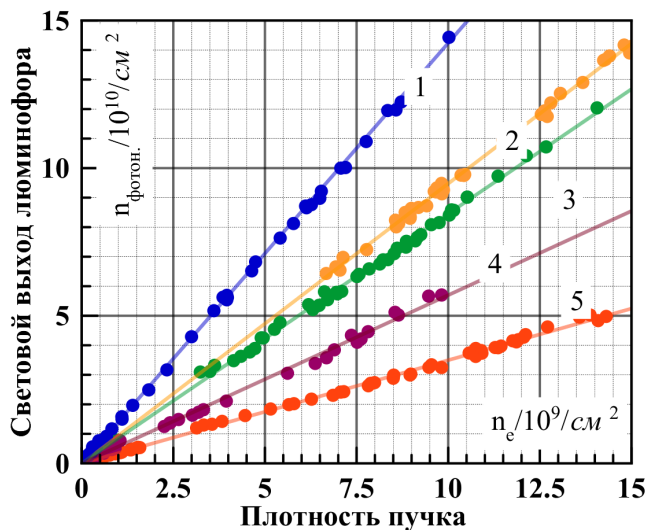


Рис. 5. Зависимость светового выхода порошковых люминофоров от плотности пучка e^- с энергией $E=354$ МэВ:

- 1 – $(ZnS, CdS) : Ag$; 2 – ZnS ;
 3 – $Gd_2O_2S : Eu$ 4 – $Gd_2O_2S : Tb$;
 5 – $Y_2O_2S : Tb$

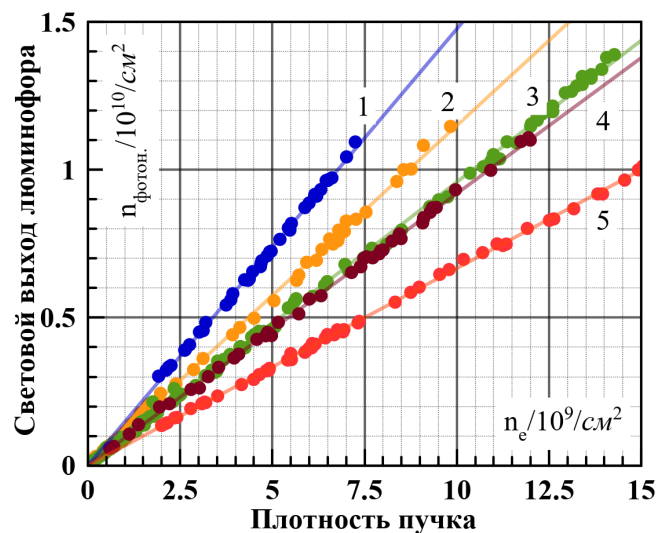


Рис. 6. Зависимость светового выхода кристаллических люминофоров от плотности пучка e^- с энергией $E=354$ МэВ:

- 1 – CWO ;
 2 – BGO ; 3 – $YAG : Ce$; 4 – ZWO ;
 5 – Рубин

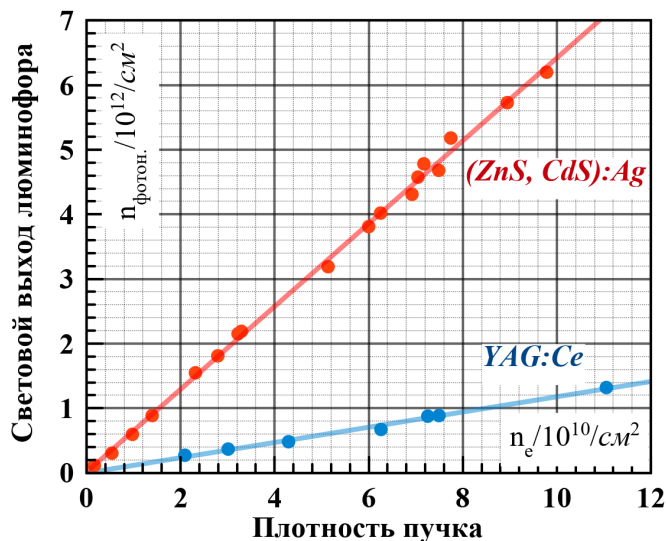


Рис. 7. Световой выход под воздействием пучка электронов с энергией 1825 МэВ

порошковым люминофором $(ZnS, CdS) : Ag$ в диапазоне плотностей от $2 \cdot 10^9$ до $10^{11} n_e/см^2$. Как показали проведённые исследования, линейность испытанных люминофоров сохраняется вплоть до плотности заряда $10^{11} n_e/см^2$.

В параграфе, посвящённом исследованию продольной структуры пучка

посредством регистрации излучения Вавилова-Черенкова, обуславливается его использование как средства диагностики невозможностью использования СИ в подобных наблюдениях для линейных ускорителей и, в частности, на инжекционном комплексе ИЯФ СО РАН. Основными целями этой работы были: изучение структуры пучка, генерируемого линейным ускорителем (линаком), с помощью стрик-камеры PS-1/S1, разработанной и изготовленной в ИОФ РАН (Москва) [12] для настройки режима работы ускорителя; проверка возможности стрик-камеры на проведение длительных измерений в сложных условиях эксплуатации.

Используемая установка включала в себя: камеру, располагающуюся на оптическом столе, находящемся непосредственно в помещении линейного ускорителя; кварцевый конус, размещаемого внутри специализированного диагностического блока, вводящего его в вакуумную камеру на пути исследуемого пучка частиц; оптическую систему, собирающую излучение на фотокатод стрик-камеры (рисунок 8).

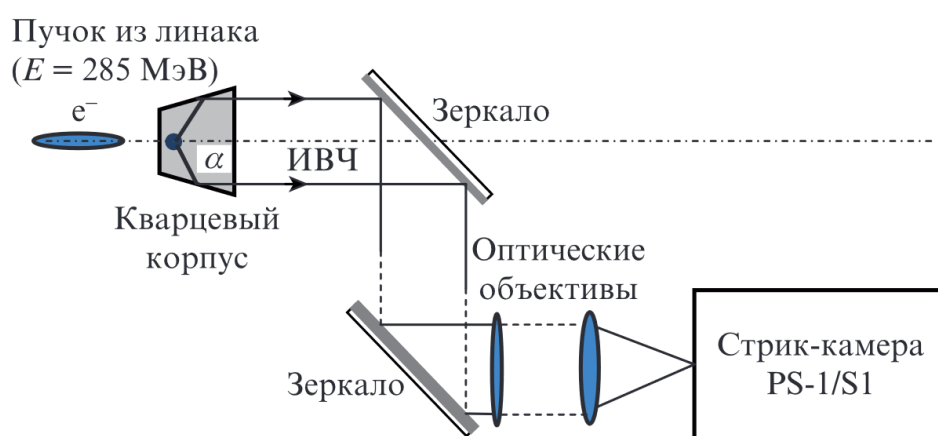


Рис. 8. Схема установки для изучения продольного распределения заряда в пучке линака ИК по регистрации излучения Вавилова-Черенкова с помощью стрик-камеры PS-1/S1

Регистрация излучения пучка при длительности развертки стрик-камеры 33 нс на экране диаметром 25 -мм выявила наличие двух сгустков, генерируемых линаком за один импульс (рисунок 9 (а)). Появление второго сгустка объясняется дефектом в формирующей линии электронной пушки линейного ускорителя и является нежелательным обстоятельством, т.к. эти частицы не попадают в НО, а теряются на стенках вакуумной камеры и создают наведен-

ный радиационный фон в защищенном зале ускорителя.

Структура первого сгустка, захватываемого в НО, исследовалась при увеличенной скорости развёртки (10 нс/экран) и приведена на рисунке 9. Отчётливо видна модуляция интенсивности, период которой соответствует частоте 500 МГц, используемой в группирующей секции линака. На рисунках 9 (б) и (в) видно изменение структуры сгустка в процессе настройки линака, а на рисунке 9 (г) форма распределения в режиме работы с оптимальными параметрами.

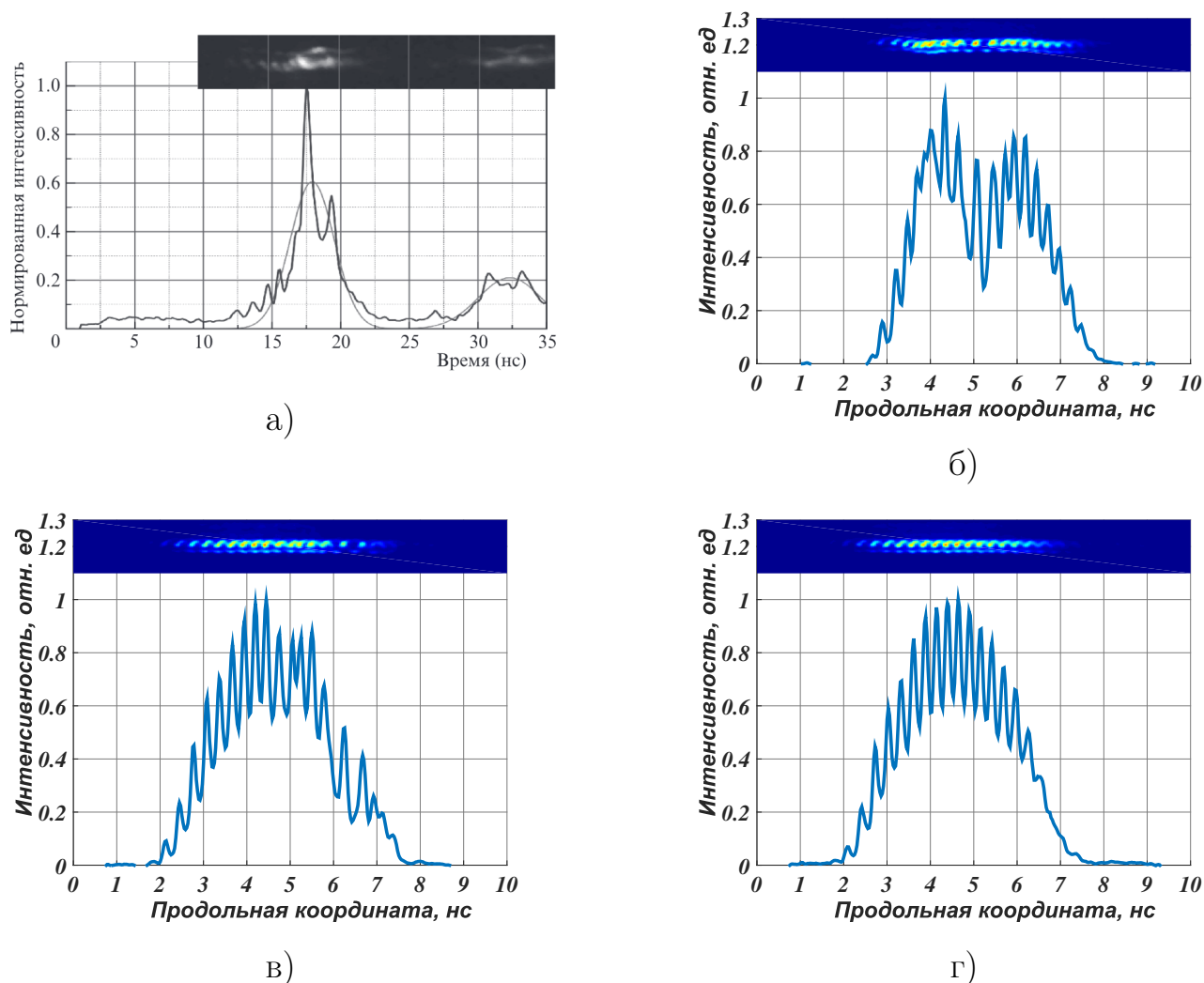


Рис. 9. Структура сгустков, генерируемых линаком и регистрируемая с помощью стрик-камеры PS-1/S1: а — два сгустка, генерируемых линаком за один импульс, и их двумерный профиль. Скорость развёртки 33 нс/экран ; б — структура первого сгустка, зарегистрированная после переключения развёртки на 10 нс/экран ; в — структура первого сгустка, зарегистрированная в процессе оптимизации настройки линака; г — форма распределения в режиме работы с оптимальными параметрами

Полученные данные позволили оптимизировать режим работы инжекционного комплекса ИЯФ СО РАН. Камера PS-1/S1 продемонстрировала безотказность при работе в условиях высокого уровня электромагнитных помех и радиационного фона. Результаты проведённого исследования были опубликованы в статье [11].

В Заключение перечислены основные результаты работы, которые одновременно являются положениями, выносимыми на защиту:

1. разработанная и введённая в строй система оптической диагностики источника СИ «КИСИ-Курчатов», способна обеспечивать комплекс информацией о требуемых параметрах пучка с необходимой точностью;
2. показана возможность достижения временного разрешения в пределах единиц пикосекунд с помощью диссектора, созданного на основе разработанного в ИОФ РАН электронно-оптического преобразователя ПИФ-01, это подтверждено прямыми измерениями на специально подготовленном стенде в Институте Общей Физики РАН (Москва);
3. световой выход исследованных люминофорных экранов в зависимости от плотности заряда в пучке линейен для плотностей вплоть до $1.5 \cdot 10^{10} e^- / \text{см}^2$ на энергии электронов 354 МэВ и до плотностей заряда $10^{11} n_e / \text{см}^2$ при энергии 1.8 ГэВ;
4. показана эффективность применения стрик-камеры в комплексе с датчиком на основе излучения Вавилова-Черенкова как средство исследования структуры пучка в линейном ускорителе.

Основные публикации по теме диссертации

1. Recent Results From New Station for Optical Observation of Electron Beam Parameters at KCSR Storage Ring / O. Meshkov, V. Dorokhov, V. Borin [и др.] // Proc. of IBIC'16 (Barcelona, Spain). — Geneva, Switzerland : JACoW, 2017. — с. 509—512. — URL: <http://jacow.org/ibic2016/papers/tupg67.pdf>.
2. A new station for optical observation of electron beam parameters at electron storage ring SIBERIA-2 / O. Meshkov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2016. — дек. — т. 11, № 12. — P12015—P12015. — DOI: [10.1088/1748-0221/11/12/p12015](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/12/p12015). — URL: <https://doi.org/10.1088%2F1748-0221%2F11%2F12%2Fp12015>.
3. The New Optical Device for Turn to Turn Beam Profile Measurement / V. Dorokhov [и др.] // Proc. of IBIC'16 (Barcelona, Spain). — Geneva, Switzerland : JACoW, 2017. — с. 594—597. — URL: <http://jacow.org/ibic2016/papers/web104.pdf>.
4. Калибровка пикосекундного электронно-оптического диссектора / О.В.Анчугов [и др.] // Автометрия. — 2016. — т. 16, № 3. — с. 108—115. — URL: https://www.iae.nsk.su/images/stories/5_Autometria/5_Archives/2016/3/14_anchugov.pdf.
5. Development, Calibration and Application of New-Generation Dissectors With Picosecond Temporal Resolution / O. Meshkov, V.L.Dorokhov [и др.] // Proc. of IBIC'16 (Barcelona, Spain). — Geneva, Switzerland : JACoW, 2017. — с. 206—209. — URL: <http://jacow.org/ibic2016/papers/mopg60.pdf>.
6. Direct temporal-resolution calibration of new-generation dissector / E. Zinin [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2016. — март. — т. 11.
7. Picosecond dissector with crossed sweep and optimization of picosecond dissector parameters / S. Andreev [и др.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. — 2019. — т. 11051.

8. A Picosecond Image-Converter Dissector with a Crossed Sweep / S. Andreev [и др.] // Instruments and Experimental Techniques. — 2020. — т. 63, № 1. — с. 87—91.
9. The optical dissector bunch length measurements at the Metrology Light Source / D. Maluyutin [и др.] // Proceedings of the 6th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2017. — 2018. — с. 125—128.
10. Experimental comparison of performance of various fluorescent screens applied for relativistic electron/positron beam imaging / V. Dorokhov [и др.] //. — Hamburg, Germany : Proceedings of DIPAC2011, 2011. — с. 558—560. — URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/DIPAC2011/papers/weob02.pdf>.
11. Регистрация излучения Вавилова–Черенкова в линейном ускорителе с помощью пикосекундной стрик-камеры / Н. С. Воробьев [и др.] // Квантовая электроника. — 2016. — т. 46, № 9. — с. 860—862. — ISSN 1468-4799. — URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/qe/v46/i9/p860>.
12. Регистрация синхротронного излучения пикосекундной стрик-камерой для диагностики пучков в циклических ускорителях / А. К. Верещагин [и др.] // Квантовая электроника. — 2016. — т. 46, № 2. — с. 185—188. — ISSN 1468-4799. — URL: <http://mi.mathnet.ru/rus/qe/v46/i2/p185>.
13. Development, calibration and application of new generation dissector with picosecond temporal resolution / O. Meshkov, V.L.Dorokhov [и др.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. — SPIE, 2017. — 103280P.
14. Пикосекундный электронно-оптический диссектор для регистрации синхротронного излучения / С. В. Андреева [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2019. — № 2. — с. 75—80. — ISSN 0032-8162. — DOI: [10.1134/S0032816219020022](https://doi.org/10.1134/S0032816219020022).
15. Пикосекундный диссектор со скрещенной разверткой / Я. Гетманов [и др.] // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. — Национальный исследовательский ядерный университет "МИ-ФИ", 2019. — с. 555—556.

Список литературы

16. *Смалюк В. В.* Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях / Под ред. чл.-корр. РАН Н.С.Диканского. — Новосибирск : Параллель, 2009. — с. 294. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/236875689>.
17. Методы оптической диагностики электрон-позитронных пучков и взаимодействия плазмы с сильноточным электронным пучком / О. Мешков [и др.] // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2012. — февр. — т. 43. — с. 451—499. — URL: http://www1.jinr.ru/Pepan/2012-v43/v-43-2/04_vyach.pdf.
18. Методы неразрушающей диагностики пучков заряженных частиц в ускорителях / П. Логачёв [и др.] // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2016. — т. 47, № 2. — URL: https://www1.jinr.ru/publish/Pepan/v-47-2/v-47-2_04_Logachev.pdf.
19. New Station for Optical Observation of Electron Beam Parameters at Electron Storage Ring SIBERIA-2 / A. S. Stirin [и др.] // Proc. of IPAC'14 (Dresden, Germany). — Geneva, Switzerland : JACoW, 2014. — с. 3611—3613. — URL: <http://jacow.org/IPAC2014/papers/thpme151.pdf>.
20. The New Optical Device for Turn-to-turn Beam Profile Measurement / O. Meshkov [и др.] // Proc. of IPAC'14 (Dresden, Germany). — Geneva, Switzerland : JACoW, 2014. — с. 3617—3619. — URL: <http://jacow.org/IPAC2014/papers/thpme153.pdf>.
21. A Picosecond Electron-Optical Dissector for Detecting Synchrotron Radiation / S. V. Andreev, O. V. Anchugov, N. Vorobiev [и др.] // Instruments and Experimental Techniques. — 2019. — т. 62, № 2. — с. 208—213. — DOI: [10.1134/S0020441219020027](https://doi.org/10.1134/S0020441219020027).
22. *Zinin E., Meshkov O.* Optical dissector for longitudinal beam profile measurement // Journal of Instrumentation. — 2015. — окт. — т. 10. — P10024—P10024. — DOI: [10.1088/1748-0221/10/10/P10024](https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/10/P10024).

23. Пикосекундная электронно-оптическая камера PS-1/S1 в физическом эксперименте / Н. С. Воробьев [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2016. — № 4. — с. 72—77. — ISSN 0032-8162. — DOI: [10.7868/S0032816216030289](https://doi.org/10.7868/S0032816216030289). — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.7868/S0032816216030289>.
24. Status and prospects of the injection complex of the Budker Institute of Nuclear Physics / A. Starostenko [и др.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2016. — т. 13, № 7. — с. 957—961.
25. VEPP-4M Optical Beam Profile Monitor with a One-turn Temporal Resolution / O. Meshkov [и др.] // Proceedings of EPAC 2004. — 2004. — с. 2733—2735. — URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e04/PAPERS/THPLT107.PDF>.
26. *Smaluk V., Meshkov O., Gurov S.* Application of the optical diagnostics during the commissioning of the booster of NSLS-II // . — Dresden, Germany : Proceedings of IPAC2014, 2014. — с. 3614—3616. — ISBN 978-3-95450-132-8. — URL: <https://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/thpme152.pdf>.
27. Turn-by-Turn Measurements for Beam Dynamics at Vepp-5 Damping Ring / M. Blinov [и др.] // Proc. of IPAC'16 (Busan, Korea). — Geneva, Switzerland : JACoW, 2016. — с. 3452—3454. — URL: <http://jacow.org/ipac2016/papers/thpnr031.pdf>.
28. Longitudinal beam distribution measurements in damping ring of VEPP-5 Injection Complex / V. Balakin [и др.] // Proc. of RuPAC'16 (Petersburg, Russia). — Geneva, Switzerland : JACoW, 2017. — с. 705—708. — ISBN 978-3-95450- URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016/papers/thpsc074.pdf>.
29. *Ries M.* Nonlinear Momentum Compaction and Coherent Synchrotron Radiation at the Metrology Light Source : дис. ... канд. / Ries Markus. — Berlin : Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät I Humboldt-Universität, 2014.
30. Metrology Light Source: The first electron storage ring optimized for generating coherent THz radiation / J. Feikes [и др.] // Phys. Rev. ST Accel. Beams. — 2011. — март. — т. 14, вып. 3. — с. 030705. — DOI: [10.1103/PhysRevSTAB](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB).

- 14.030705. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.14.030705>.
31. *Jankowiak A., Wüstefeld G.* Low- α Operation of BESSY II and Future Plans for an Alternating Bunch Length Scheme BESSYVSR // Synchrotron Radiation News. — 2013. — май. — т. 26. — DOI: [10.1080/08940886.2013.791212](https://doi.org/10.1080/08940886.2013.791212).
32. Тормозящие плёнки для пикосекундных диссекторов нового поколения / Н. В. Агеева [и др.] // Автометрия. — 2016. — т. 52, № 3. — с. 100—107. — DOI: [10.15372/AUT20160313](https://doi.org/10.15372/AUT20160313). — URL: https://www.iae.nsk.su/images/stories/5_Autometria/5_Archives/2016/3/13_ageeva.pdf.

Научное издание

ДОРОХОВ ВИКТОР ЛЕОНИДОВИЧ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук на тему:

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ В
ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Подписано в печать 25.02.2021 г.

Формат 60 × 90 1/16. Объем 0.7 печ.л., 0.6 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ 256.

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11