

На правах рукописи

НОВОКШОНОВ АРТЁМ ИГОРЕВИЧ

**ДИАГНОСТИКА ПОПЕРЕЧНЫХ
ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ И ГАММА
ПУЧКОВ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

Специальность 01.04.20 — Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск — 2017

Работа выполнена на кафедре Прикладной физики Физико-технического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Потылицын Александр Петрович

Официальные оппоненты: **Кубанкин Александр Сергеевич**,
доктор физико-математических наук,
Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
профессор кафедры теоретической и математической физики

Купер Константин Эдуардович,
кандидат физико-математических наук,
Сибирское отделение Российской академии наук
«Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера»,
старший научный сотрудник ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Российской академии наук «Физический институт имени П.Н. Лебедева»

Защита состоится «21» ноября 2017 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 2а, ауд. 326.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/912/worklist>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.05, к.ф.-м.н., доцент

А.В. Кожевников

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Ускорительные технологии успешно применяются в различных областях деятельности человека, таких например, как медицина, биология, дефектоскопия, системы безопасности, фундаментальные и прикладные исследования. По мере развития ускорительных технологий, происходит непрерывное улучшение параметров ускоряемых пучков частиц. Первые ускорители, созданные в 30х годах прошлого века, занимали не более нескольких квадратных метров площади, сейчас же площади, занимаемые ими, превышают квадратный км, а сами ускорители являются дорогостоящими и уникальными установками. Все параметры ускорителя должны контролироваться в непрерывном режиме (в том числе характеристики ускорительного пучка, причем для каждого поколения ускорителей повышаются требования к точности измерений). Пучок частиц ускорителя является его конечным «продуктом», поэтому соответствие реальных параметров ускоренного пучка проектным является основным критерием работы ускорителя. Для контроля всех параметров применяется множество различных систем диагностики. Подбор оптимальной системы для данного ускорителя является достаточно сложной задачей, потому что каждая система диагностики имеет свои недостатки и достоинства, а каждый ускоритель является машиной уникальной в своем роде. Все системы диагностики делятся на два основных типа: возмущающие и невозмущающие. К возмущающим системам диагностики относятся такие, где пучок либо полностью разрушается, либо претерпевает кардинальные изменения. Невозмущающие же системы - это системы, где пучок практически не испытывает никаких изменений.

Исходя из выше сказанного следует, что разработка и усовершенствование систем диагностики пучка частиц является весьма актуальной в области ускорительной техники.

В работе приведены результаты исследований систем диагностики поперечного профиля пучка, основанных на использовании оптического диапазона излучения. Такой выбор не случаен: поперечный профиль пучка - один из важнейших параметров, а оптика чрезвычайно удобна для работы с ней и обладает высокой помехозащищенностью. В диссертации исследовались возможности оптической диагностики электронных и гамма пучков электронных ускорителей с энергией 6 МэВ и методов диагностики пучка электронного накопителя PETRA III. Первая система диагностики основывается на излучении Вавилова-Черенкова, генерируемого в оптических фиберах, вторая - на интерферометрии синхротронного излучения.

Актуальность системы диагностики поперечного профиля по излучению Вавилова-Черенкова, генерируемого в оптических фиберах, обусловлено перспективностью применения для медицинских ускорителей. В этой области

применяются в основном три системы: проволочные детекторы [1], ионизационная камера [2], рентгенографические пленки [3]. Проволочные детекторы обладают такими минусами как слабая чувствительность и невозможность измерения профиля гамма пучков, ионизационная камера - плохое пространственное разрешение и высокая стоимость, рентгенографические пленки не могут применяться в режиме on-line. Поэтому разработка новой системы диагностики, основанной на использовании оптических волокон, для гамма пучков медицинских ускорителей является весьма актуальной. Возможность использования волокон для диагностики электронных пучков продемонстрирована в работах [4].

Система диагностики поперечных размеров пучка электронов кольцевых ускорителей, основанная на интерферометрии синхротронного излучения (интерферометр синхротронного излучения) успешно используется на многих установках около 20 лет [5]. Интерферометр обычно применяется для измерения размера пучка в одном направлении (1-D интерферометр). Интерферометр, позволяющий измерять сразу два размера, σ_x и σ_y , (2-D интерферометр) существует только на ускорителе Spring-8 [6]. Система диагностики такого типа позволяет измерять пучки менее 10 мкм, однако существует возможность улучшить разрешение системы. Стоит отметить, что интерферометр относится к невозмущающим системам диагностики. Моделирование, разработка, создание 2-D интерферометра и исследование улучшения пространственного разрешения является актуальной задачей.

Данная работа имела следующие цели:

1. Исследовать возможность диагностики большеразмерного поперечного профиля гамма пучка по излучению Вавилова-Черенкова, генерируемого в оптических фиберах, в условиях высокой фоновой загрузки.
2. Промоделировать 2-D интерферометр синхротронного излучения для ускорителя PETRA III (DESY, Гамбург, Германия).
3. Создать, настроить и запустить в эксплуатацию 2-D интерферометр на накопителе PETRA III. Экспериментально проверить новые методики улучшения интерферометра.

В соответствии с целями работы в диссертации рассматриваются следующие основные задачи:

1. Создание экспериментальной установки на электронном пучке микротрона МИ-6 (ТПУ) для исследования характеристик излучения, возникающего в оптических фиберах и проведение экспериментов на данной установке. Анализ полученных результатов и оценка пространственного разрешения.

2. Создание экспериментальной установки на линейном ускорителе СЛ75-5-МТ (ТПУ) для исследования профиля гамма пучка по черенковскому излучению в фиберах и проведение экспериментов на данной установке. Анализ полученных результатов и оценка пространственного разрешения.
3. Моделирование и выбор параметров 2-D интерферометра для диагностики поперечных размеров электронного пучка накопительного кольца PETRA III.
4. Создание, настройка и отладка предложенного 2-D интерферометра на накопительном кольце PETRA III и написание программного обеспечения для работы с интерферометром.
5. Анализ полученных данных, оценка достигнутого пространственного разрешения 2-D интерферометра и исследование методов его улучшения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложена и обоснована методика измерения поперечного профиля гамма пучка с энергией до 10 МэВ при помощи излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого в оптическом фибере.
2. Впервые промоделирован 2-D интерферометр синхротронного излучения в пакете Synchrotron Radiation Workshop. Результаты моделирования подтверждены экспериментально.
3. На накопительном кольце PETRA III (DESY) собран, настроен и запущен в эксплуатацию 2-D интерферометр синхротронного излучения.
4. Экспериментальные исследования методов улучшения характеристик 2-D интерферометра согласуются с результатами моделирования.

Научная новизна представленных в диссертации результатов:

1. На электронном и гамма пучке с энергией 5 – 6 МэВ испытана предложенная методика измерения профиля пучка оптическим фибром. Впервые показана возможность измерения поперечного профиля гамма пучка оптическим фибром.
2. На накопительном кольце PETRA III был разработан и создан 2-D интерферометр синхротронного излучения. На данном интерферометре было проведено сравнение результатов моделирования 2-D интерферометра с экспериментальными результатами и показано хорошее согласие.

3. Впервые экспериментально исследована техника «затемнения» для 2-D интерферометра в двух направлениях и показана перспективность её применения при выборе соответствующей технологии получения фильтров.
4. Впервые экспериментально исследована техника поворота щелей 2-D интерферометра.

Научная и практическая значимость. Методику измерения поперечного профиля электронного и гамма пучка при помощи излучения Вавилова-Черенкова в оптических фиберах, предложенную и апробированную в работе, можно применять на МэВ-ных пучках компактных ускорителей для быстрой и неразрушающей диагностики. Её применение особенно актуально на пучках ускорителей с энергиями несколько МэВ, а размеры поля могут варьироваться от 0.5×0.5 до 40×40 см. Примером ускорителей, для которых может быть использована такая методика, являются медицинские ускорители, где такая диагностика может дополнить уже используемые системы, которые обладают такими недостатками как низкое пространственное разрешение, невозможность использования в режиме on-line и т.д.

Написанный код по моделированию интерферометра синхротронного излучения в дальнейшем может применяться для других ускорителей, а также для моделирования новых методик и подходов к этой системе диагностики. Улучшена система диагностики поперечного размера пучка электронов накопительного кольца PETRA III: до работ, описанных в диссертации, на данном ускорителе действовал 1-D интерферометр, обладавший рядом недостатков, а в настоящее время применяется 2-D интерферометр. Произведены систематические исследования работы 2-D интерферометра. Результаты исследований, могут быть использованы на циклических ускорителях, уже использующих интерферометры, а также для создания новых интерферометров.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. Международный симпозиум «RREPS 2015» (г. Санкт-Петербург, Россия);
2. XI Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц, посвященный памяти В.П.Саранцева, 2015 (г. Алушта, Россия);
3. International workshop on beam diagnostics «DEELS 2016» (DESY, г. Гамбург, Германия);
4. International beam instrumentation conference «IBIC 2016» (ALBA, г. Барселона, Испания);

5. XXV Russian particle accelerator conference «RuPAC 2016» (г. Санкт-Петербург, Россия);

Диссертационная работа была выполнена при поддержке гранта № 3.709.2014/К программы «Наука» Министерства Образования и Науки РФ.

Личный вклад. Автором производилось создание, настройка и калибровка экспериментальной аппаратуры на низкоэнергетических ускорителях МИ-6 и СЛ75-5-МТ; написание кода по моделированию 2-D интерферометра и само моделирование; сборка, настройка и отладка 2-D интерферометра на накопителе PETRA III, написание программного обеспечения для него, проведение экспериментов и анализ полученных результатов; подготовка публикаций и их представление.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 публикациях [a – f], 3 из которых рекомендованы ВАК [a – c].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 95 страницы, включая 81 рисунков, 13 таблиц и список литературы, содержащий 81 наименования.

Содержание работы

Во **Введении** описывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор научной литературы по исследуемому вопросу, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям системы диагностики поперечного профиля электронного и гамма пучков, основанной на излучении Вавилова-Черенкова, генерируемого в оптических фиберах. Кратко описана проблематика измерения поперечного профиля пучков медицинских ускорителей поскольку именно в этой области планируется применение данной системы диагностики. Основные параметры пучков медицинских ускорителей показаны в таблице 1. Также, в главе показаны схемы экспериментальных установок на микротроне МИ-6 (ТПУ) и СЛ75-5-МТ (ТПУ) и продемонстрированы результаты экспериментальных исследований на этих установках.

Принцип действия предложенной системы диагностики, показанный на рисунке 1. На этом рисунке показаны две проекции в момент, когда пучок заряженных частиц проходит сквозь фибер. Пучок частиц показан штрихованной линией, он движется в направлении оси Z (вектор скорости \vec{v}). Фибер может передвигаться вдоль оси X. Частицы пучка, пролетающие сквозь

Таблица 1 – Основные требования к пучкам медицинских ускорителей.

Параметр	Значение
Размер дозовых полей	от 0.5×0.5 до 40×40 см
Энергия фотонов (максимальная)	6, 10, 15, 18 МэВ
Энергия электронов	4, 6, 9, 12, 15, 18 МэВ

него, генерируют в нем черенковское излучение, а интенсивность излучения пропорциональна количеству таких частиц. Таким образом, если равномерно передвигать фибер поперек пучка («сканировать» вдоль оси X) и измерять интенсивность излучения на его выходе фотодетектором, можно измерить горизонтальный профиль пучка. Разрешение определяется диаметром фибера. Такое же измерение можно произвести и для вертикального направления, повернув фибер на 90° . На рисунке 1 справа фибер находится под углом θ к оси Z, что приводит к увеличению сигнала на конце фибера. Увеличение сигнала происходит из-за того, что излучение Вавилова-Черенкова, генерируется под углом $\theta_{ch} = \arccos\left(\frac{c}{nv}\right)$ к траектории частицы (v - скорость частицы). Следовательно, если наклонить фибер именно под этим углом, то излучение будет распространяться вдоль фибера, что позволяет детектировать его фотодетектором на выходе фибера. Если выставленный угол θ незначительно отличается от угла θ_{ch} , то в таком случае большая часть излучения будет распространяться по фиберу из-за того, что оно будет попадать в угол полного отражения внутри фибера. В случае, когда фибер расположен перпендикулярно к оси Z практически все излучение будет покидать объем фибера поскольку будет отсутствовать эффект переотражения и сигнал будет много слабее.

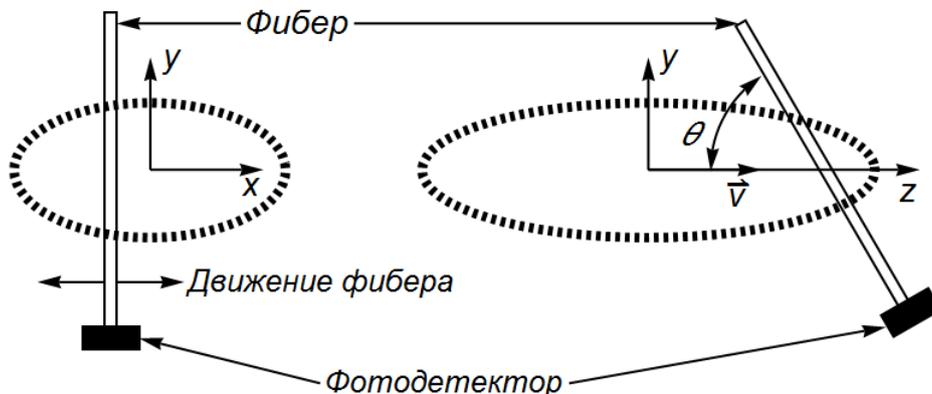


Рис. 1 – Принцип действия системы диагностики на излучении Вавилова-Черенкова, генерируемого в оптических фиберах.

Регистрация излучения на конце фибера производилась кремниевым ФЭУ Sensl MicroSB [7].

Апробирование системы сканирования поперечного профиля электронного пучка на основе оптоволокна с субмиллиметровым разрешением, производилось на микротроне МИ-6 Томского политехнического университета с энергией выведенного пучка 5,7 МэВ. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2. Электронный пучок, ускоренный в микротроне, проходит через фокусирующий магнит, первый коллиматор, индукционный датчик, второй коллиматор диаметром 1 мм, после этого, через алюминиевое выходное окно толщиной ≈ 100 мкм выходит в атмосферу. Угловая расходимость пучка после выходного окна и слоя воздуха толщиной 50 мм была оценена как $\approx 5^\circ$. В атмосфере на пути пучка устанавливались либо рентгенографические пленки, либо оптический фибер на различных расстояниях от выходного окна. Фибер и пленки устанавливались на одинаковых расстояниях, что позволило сравнить результаты измерений. Фибер перемещался перпендикулярно траектории движения пучка в вертикальном или горизонтальном направлении. Применялся фибер длиной от 2 до 10 м.

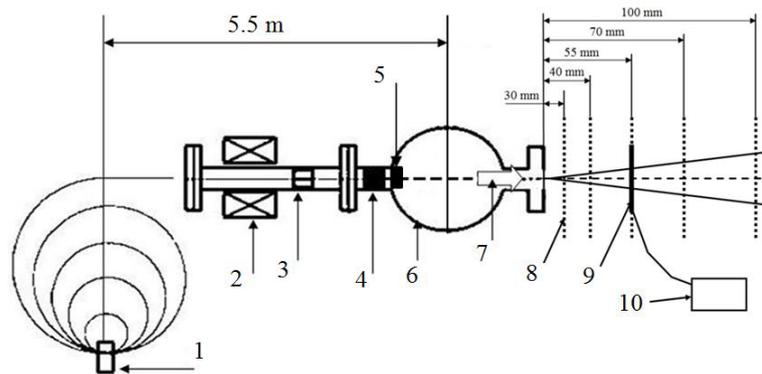


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки. 1 - инжектор микротрона; 2 - фокусирующий магнит; 3 - коллиматор; 4 - индукционный датчик; 5 - коллиматор диаметром 1 мм; 6 - экспериментальная камера; 7 - электронный пучок; 8 - рентгенографические пленки (штрихованные линии); 9 - фибер; 10 - кремниевый ФЭУ.

Были проведены измерения ориентационной зависимости - зависимости уровня сигнала на выходе фибера (световыход) от угла его поворота относительно траектории пучка θ (см. рисунок 1). Результат таких измерений для стеклянного фибера длиной 2 м и диаметром 0.6 мм представлен на рисунке 3. На этом рисунке точки - экспериментальные данные, сплошная кривая - их аппроксимация. Время экспозиции в каждой точке было равно 2 секундам, что соответствовало прохождению через фибер 50 сгустков (частота сброса микротрона = 25 Гц). Конечный результат (значение амплитуды сигнала при данном угле) получался усреднением по 50 сгусткам. Из рисунка видно, что максимальный сигнал приходится на угол $\theta_{max} \approx 44^\circ$, что соответствует значению черенковского угла $\theta_{ch} = 44^\circ$ для стекла. В левой части зависимости

наблюдается увеличение сигнала, что связано с взаимодействием электронного пучка с металлическим держателем оптоволокна при малых углах.

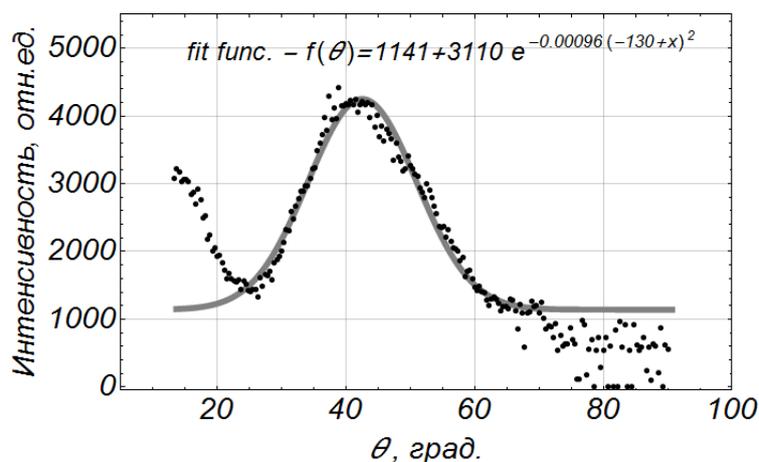


Рис. 3 – Ориентационная зависимость для стеклянного волокна ($d = 0.6$ мм).

Такие же измерения были проведены и для пластикового волокна ($d = 0.125$ мм). Для этого волокна измеренное значение угла $\theta_{max} \approx 48^\circ$, что тоже хорошо согласуется с расчетным значением. Однако, сигнал с пластикового волокна был существенно слабее, поэтому дальнейшие эксперименты проводились со стеклянным волокном. Измерения ориентационной кривой позволили подтвердить, что наблюдается именно черенковское излучение.

Максимальный сигнал на выходе волокна достигается, когда волокно наклонено под углом θ_{ch} к направлению движения пучка частиц. Однако измерять профиль пучка при наклоненном волокне некорректно, потому что происходит искажение истинного размера. Схематически объяснение этого факта представлено на рисунке 4. На этом рисунке волокно параллельно плоскости xy и наклонено под углом θ_{ch} к оси z . Штрихованными линиями обозначено излучение (пучок электронов), $\Delta\theta$ - угловое расхождение пучка. Волокно, на этом рисунке, перемещается вдоль оси x (измерение горизонтального профиля). Из рисунка видно, что взаимодействие излучения с волокном происходит в точках с различными координатами z , т.е. происходит усреднение результатов по некоторому интервалу Δz . Из этих рассуждений следует, что единственное правильное положение волокна это положение под углом 90° к оси z в полной аналогии с проволочным сканером. Однако при таком положении волокна возникает вопрос об амплитуде сигнала. Как показано на рисунке 3, при углах θ близких к 90° сигнал практически исчезает. Для увеличения оптического сигнала волокно экранировалось тонким слоем свинца (90 мкм). Этот слой рассеивал электроны, которые в результате попадали в волокно под углом отличным от 90° , что, в свою очередь, приводило к увеличению сигнала. Можно сказать, что таким образом волокно искусственно наклонялось относительно оси z .

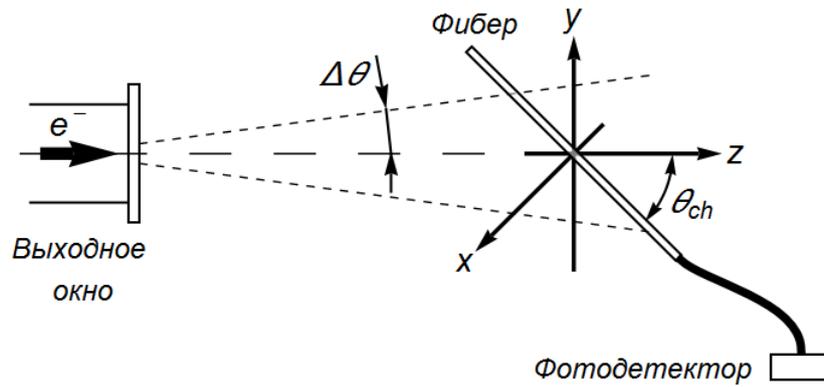


Рис. 4 – Схема взаимодействия пучка с наклоненным фибром.

Последним этапом исследований на микротроне МИ-6 были измерения поперечного профиля электронного пучка рентгенографическими пленками Gafchromic EBT и фибром и сравнение результатов. Горизонтальный профиль пучка, измеренный фибром на разных расстояниях от выходного окна, показан на рисунке 5, а профиль, снятый пленками - на рисунке 6. Вертикальный профиль совпадал с горизонтальным (пучок круглый). Видно, что результаты измерения с фибром на $3 \div 4$ мм больше, чем результаты полученные с пленками. Чтобы объяснить это, рассмотрим подробнее поперечное сечение фибера, схематически показанного на рисунке 7а. Зона №1 - это непосредственно оптоволокно, диаметр которого равен 0.6 мм; зона №2 - заводская изоляция, диаметр которой (с учетом диаметра фибера) равен ≈ 3 мм; Последняя, 3 зона - свинцовая фольга толщиной 90 мкм. Таким образом, полный диаметр фибера равен ≈ 3.2 мм. На рисунке 7б показана позиция фибера при сканировании поперечного профиля пучка. Белая точка внутри фибера - оптоволокно, а черное кольцо вокруг - оболочка. Видно, что «активная» оптоволоконная жила еще не достигла пучка, однако свинцовая оболочка уже взаимодействует с ним, рассеивая электроны, которые начинают попадать в фибер и порождать там черенковское излучение. Именно поэтому профиль пучка, измеренный фибром, получается шире.

Аналогичная апробация системы диагностики была сделана для гамма пучка ускорителя СЛ75-5-МТ (ТПУ) [8]. Схема экспериментальной установки была такой же. Принцип действия системы на гамма пучке отличается тем, что свинцовая оболочка фибера является, в первую очередь, «конвертером» фотонов в электроны, которые, в свою очередь, генерируют излучение в фибере. В данном случае сравнение результатов было сделано не с рентгенографическими пленками, а с результатами сканирования гамма пучка дозиметром UNIDOS E [9] с ионизационной камерой РТW 30013 [10]. Вертикальный профиль гамма пучка, измеренный фибром и дозиметром на расстояниях 6 и 24 см от коллиматора размером 42×42 мм, показан на рисунках 8 и 9

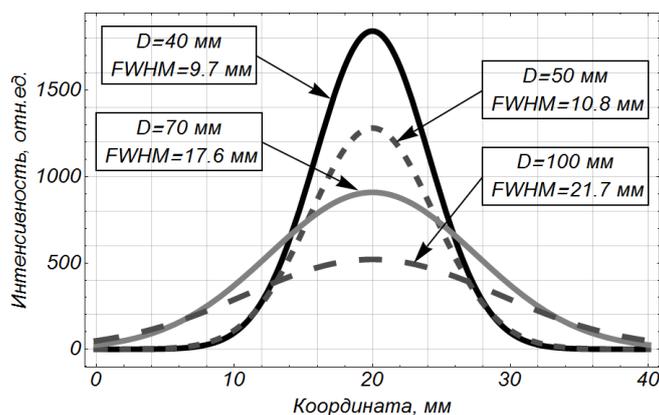


Рис. 5 – Горизонтальный профиль пучка, измеренный фибром на расстояниях 40, 50, 70 и 100 мм от выходного окна.

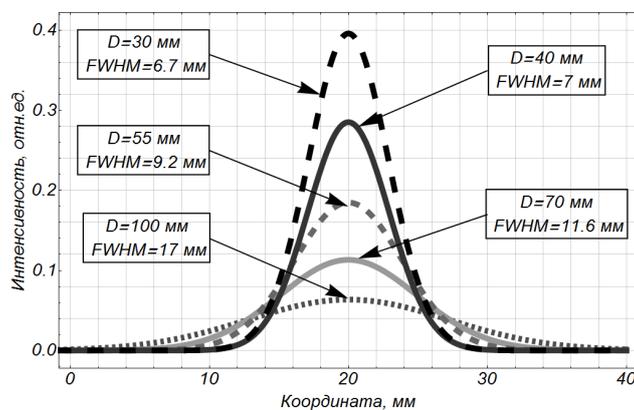


Рис. 6 – Горизонтальный профиль электронного пучка, снятый на рентгенографическую пленку на расстояниях 30, 40, 55, 70 и 100 мм от выходного окна.

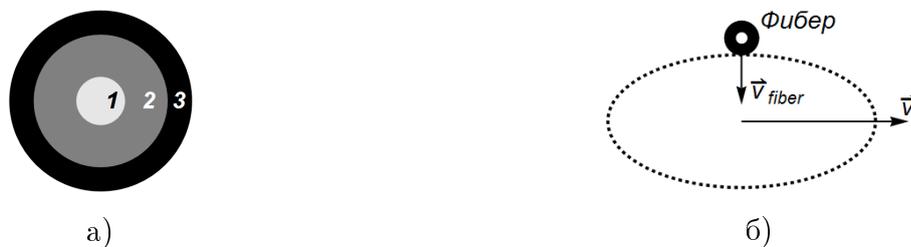


Рис. 7 – Пояснение уширения поперечного размера, измеренного фибром: а - поперечное сечение фибера, б - схема взаимодействия пучка с фибром.

соответственно. Из рисунков видно, что результаты измерений согласуются друг с другом.

Во **второй главе** диссертации описываются принципы действия, характеристики и основные параметры интерферометров синхротронного излучения. Здесь же приводятся результаты моделирования интерферометра для ускорителя PETRA III (DESY, г. Гамбург).

В разделах 2.1, 2.2, 2.3 описываются характеристики синхротронного излучения и принципиальные схемы интерферометров. На рисунке 10 показана принципиальная схема интерферометра: электронный пучок, проле-

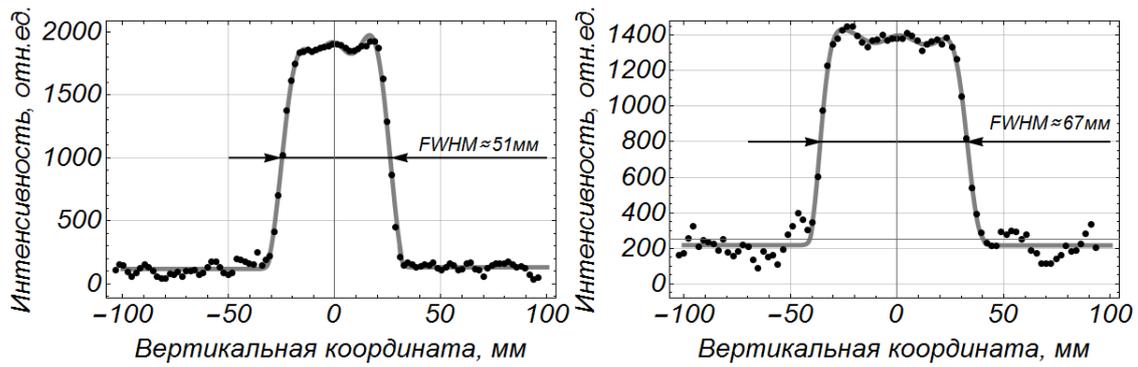


Рис. 8 – Вертикальный профиль пучка, измеренный фибером на расстояниях 6 см (слева) и 24 см (справа) от коллиматора размером 42×422 мм.

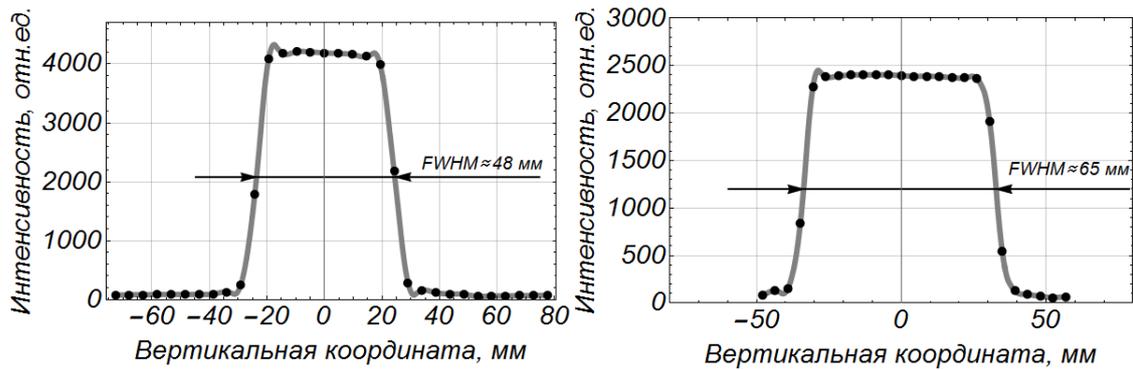


Рис. 9 – Вертикальный профиль пучка, измеренный ионизационной камерой на расстояниях 6 см (слева) и 24 см (справа) от коллиматора размером 42×42 мм.

тая в поворотном магните, генерирует СИ, которое проходит через щели, линзу, светофильтр и поляризатор и образует интерференционную картину на экране y , которая измеряется детектором с заданным пространственным разрешением (ССD-камера). Линза необходима для фокусировки излучения, прошедшего через щели, на экране. Интерферометр использует квазимонохроматичное поляризованное излучение, именно для этого перед экраном ставятся светофильтр и поляризатор. Щели располагаются симметрично относительно оси начального электронного пучка.

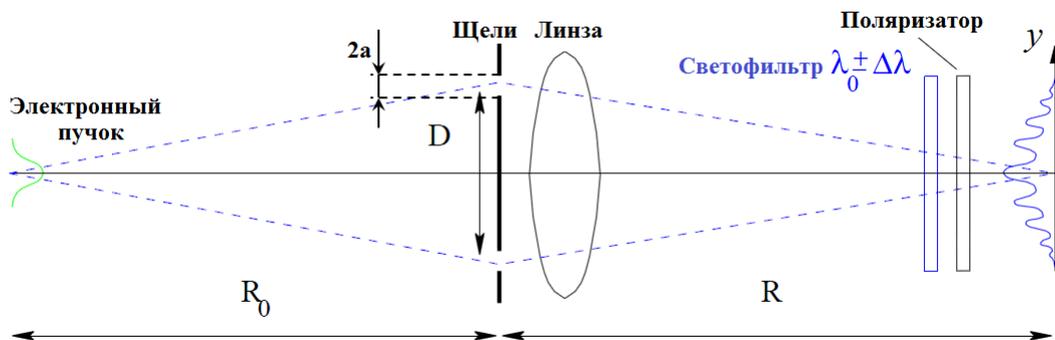


Рис. 10 – Принципиальная схема интерферометра.

Размер пучка определяется по полученной интерферограмме: чем меньше размер пучка тем «глубже» минимумы интерферограммы и наоборот.

Интенсивность интерференционной картины зависит от степени взаимной пространственной когерентности щелей γ [11] и даётся формулой [12]:

$$I(y) = I_0 \left[J_1 \left(\frac{2\pi ay}{\lambda_0 R} \right) / \left(\frac{2\pi ay}{\lambda_0 R} \right) \right]^2 \left[1 + |\gamma| \cos \left(\frac{2\pi D y}{\lambda_0 R} + \phi \right) \right], \quad (1)$$

где $J_1()$ - функция Бесселя первого порядка, a - радиус апертуры, D - расстояние между апертурами (см. рис. 10), R - расстояние от апертур до экрана (см. рис. 10), λ_0 - длина волны СИ, используемого для измерений, ϕ - фаза интерферограммы, I_0 - сумма интенсивности СИ от обеих апертур. Зная геометрию установки, можно аппроксимировать полученную интерферограмму этой формулой, получив при этом значение пространственной когерентности γ . Используя полученное значение можно вычислить размер пучка по формуле:

$$\sigma_{beam} = \frac{\lambda_0 R}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \frac{1}{\gamma}}. \quad (2)$$

Формула 1 справедлива только для круглых щелей, однако, применяться могут и прямоугольные, для которых формула выглядит так:

$$I(y) = I_0 \left[\text{sinc} \left(\frac{2\pi ay}{\lambda_0 R} \right) \right]^2 \left[1 + |\gamma| \cos \left(\frac{2\pi D y}{\lambda_0 R} + \phi \right) \right]. \quad (3)$$

Здесь a - полуширина щели.

Все вышесказанное относится к 1-D интерферометру - интерферометру, который позволяет измерить только один размер пучка (вертикальный или горизонтальный). Также существует 2-D интерферометр. Его отличие заключается в количестве щелей - четыре вместо двух. Геометрия круглых щелей для 1-D и 2-D интерферометров показана на рисунке 11. В таком случае интерференция наблюдается сразу в двух направлениях. В этом случае, применяя формулу 1 для обоих направлений, можно получить сразу два размера. Пример интерференционной картины для 2-D интерферометра с круглыми щелями, полученной на интерферометре накопительного кольца PETRA III, показан на рисунке 12.

Далее описывается библиотека по моделированию синхротронного излучения - Synchrotron Radiation Workshop (SRW). Всю информацию об SRW можно найти на странице разработчика [13]. Первый релиз библиотеки был сделан в 1998 г., с тех пор она получила широкую известность среди специалистов по физике ускорителя. Результаты моделирования неоднократно подтверждались экспериментально. Её большой плюс заключается в том, что она находится в свободном доступе.

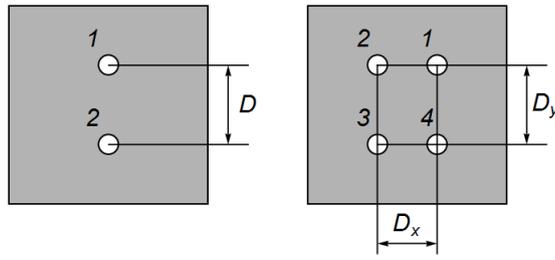


Рис. 11 – Геометрия щелей: слева - для 1-D интерферометра, справа - для 2-D интерферометра.

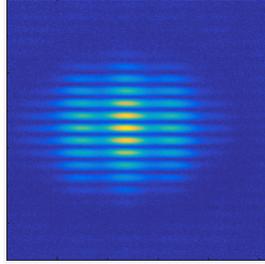


Рис. 12 – Интерференционная картина 2-D интерферометра накопительного кольца PETRA III с круглыми щелями.

Эта библиотека, в связке с языком программирования Python, применялась для моделирования 2-D интерферометра для синхротрона PETRA III (основные параметры ускорителя представлены в таблице 2). Моделирование производилось для получения примерной геометрии щелей интерферометра и моделирования методов его усовершенствования.

Таблица 2 – Основные параметры синхротрона PETRA III.

Параметр	Значение
Энергия электронов	6.01 ГэВ
Среднеквадратическое отклонение энергии электронов	0.1 %
Ток пучка	100 мА
Горизонтальный эмиттанс	1.2 нм рад
Вертикальный эмиттанс	0.012 нм рад

Геометрия подбиралась таким образом, чтобы интерференционная картина в обоих направлениях входила в матрицу CCD-камеры размером 8.98×6.7 мм (JAI VM-141GE [14]) и разрешения камеры (6.45 мкм в обоих направлениях) было достаточно для аппроксимации. По итогам моделирования была подобрана оптимальная геометрия круглых щелей интерферометра: $D_x = 7$ мм, $D_y = 20$ мм, $a = 3.5$ мм. На рисунке 13 показана промоделированная интерференционная картина, её проекции, аппроксимация и восста-

новленные поперечные размеры пучка для таких параметров 2-D интерферометра. Восстановленные размеры совпадают с заданными при моделировании.

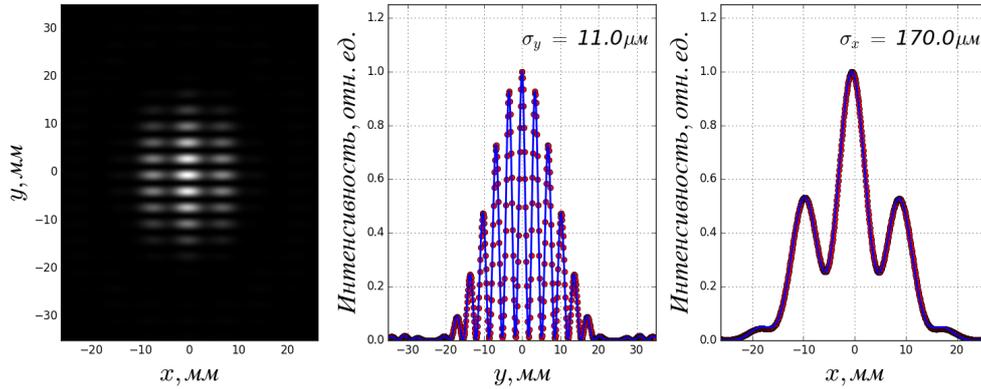


Рис. 13 – Промоделированная интерференционная картина. Красные точки - данные моделирования, синяя линия - аппроксимация формулой 1.

Для прямоугольных щелей геометрия получилась следующей: $D_x = 7$ мм, $D_y = 20$ мм, $a_x = 2$ мм, $a_y = 2$ мм.

Также была произведена оценка минимального количества фотонов синхротронного излучения в секунду, попадающих на матрицу CCD-камеры для выбранных параметров, $\Delta N_{\text{ф}} \approx 5 \cdot 10^5$ ф/сек.

Далее были промоделированы методы усовершенствования 2-D интерферометра. Для 1-D интерферометров существует метод «затемнения» [15] и метод восстановления полного профиля пучка путем поворота щелей вокруг оси интерферометра [16]. Эти методы до сих пор не применялись для 2-D интерферометра, поэтому решено было провести моделирование для выбранных параметров 2-D интерферометра.

Методика «затемнения» позволяет достигнуть лучшего разрешения интерферометра. Допустим, мы имеем пучок размером менее 3-4 мкм, тогда минимумы интерферограммы находятся на уровне фона CCD-камеры, который и задает предел измерений. Улучшение разрешения происходит в случае, когда каким-либо способом удастся искусственно «приподнять» минимумы над уровнем фона. Именно это и происходит при использовании метода «затемнения». Ранее, аппроксимируя формулой 1 интерферограмму, была получена степень когерентности γ , которая, в силу действия теоремы Ван Циттерта-Цернике, равна функции «видности», которая определяется формулой:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (4)$$

где I_{max} и I_{min} - значение любых располагающихся рядом максимума и минимума интерферограммы. Однако, равенство γ и V верно только в случае, если интенсивность излучения в обеих щелях (пока рассмотрим случай 1-D

интерферометра) одинакова. На самом деле степень когерентности и функция «видности» связаны выражением:

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma|, \quad (5)$$

где I_1 и I_2 - интенсивности СИ в апертуре 1 и 2 соответственно. Указанной аппроксимацией изначально получена функция «видности» и только при условии равенства $I_1 = I_2$, мы имеем $V = |\gamma|$. В общем случае необходимо учитывать коэффициент $K = I_1/I_2$.

Моделирование метода «затемнения» показало, что простая формула 2 для оценки размера неприменима для 2-D интерферометра.

Вторая методика - восстановление полного профиля пучка путем поворота щелей. Методика предельно проста: при вращении щелей интерферометра от 0 до 180° , можно получить размеры при разных углах поворота, и по полученным размерам можно восстановить профиль.

Моделирование метода поворота показало, что такая возможность есть только при использовании 1-D интерферометра.

В третьей главе описано создание, настройка, запуск в эксплуатацию 2-D интерферометра синхротронного излучения на ускорителе PETRA III и проведения экспериментальных исследований по методикам «затемнения» и поворота щелей.

На рисунке 14 показана схема новой установки. Излучение, генерируемое электронным пучком, выводится из вакуумной камеры зеркалом 1, а из ускорительного тоннеля - зеркалом 2, после этого зеркалом 3 направляется в апертуры. Пройдя апертуры, излучение фокусируется линзой 1 (Borg 50 ED, $f'=500$ мм фокусное расстояние линзы - 510 мм) в точке, где находится линза 2, необходимая для увеличения изображения. Получившаяся интерферограмма регистрируется CCD-камерой (JAI VM-141GE). В установке используются светофильтры с шириной полосы пропускания FWHM=10 нм, а так же σ -поляризатор (Karl Lambrecht Corporation, MGT25S20). Расстояние между источником излучения и апертурами $R_0 = 14.2$ м.

Для обработки полученной интерференционной картины было написано приложение в лицензионном пакете Matlab© client. Приложение позволяет получать изображение с CCD-камеры, строить вертикальную и горизонтальную интерференционные картины, аппроксимировать их и вычислять размер пучка. Через интерфейс приложения пользователь может задать исходные параметры функции аппроксимации, коэффициент усиления и время экспозиции камеры, и режим работы приложения: получить одно изображение, обработать его и остановится (разовое измерение) или проделывать эту процедуру, пока пользователь принудительно не остановит (продолжительные измерения). Вычисляя σ_x и σ_y , приложение рассчитывает значения

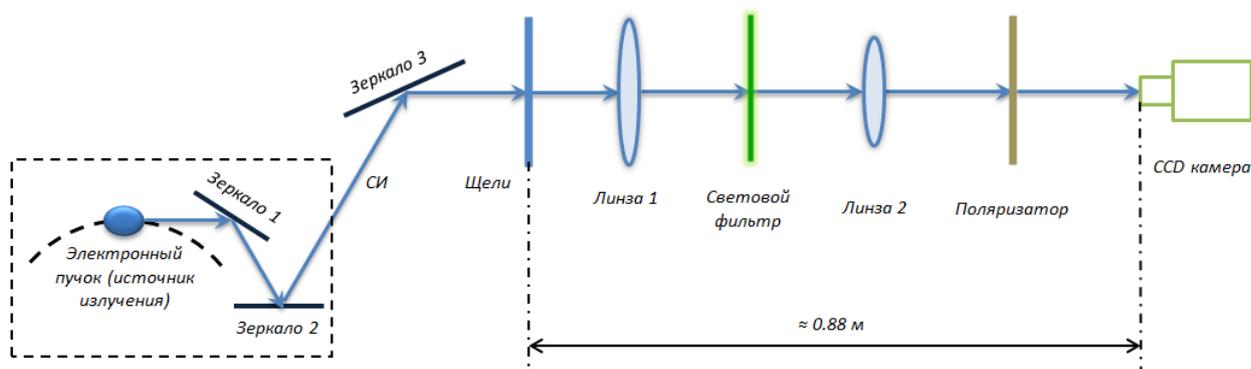


Рис. 14 – Схема интерферометра. Штрихованной линией показана та часть интерферометра, которая находится в тоннеле ускорителя.

эмиттанса, учитывая значения бета-функции Твисса, заранее рассчитанной и описанной в приложении. Зависимости поперечных размеров и эмиттанса от времени сохраняются в файле (если включен режим продолжительных измерений).

На рисунке 15 слева представлена промоделированная интерференционная картина при выбранной ранее геометрии, а справа - полученная на 2-D интерферометре PETRA III при такой же геометрии.

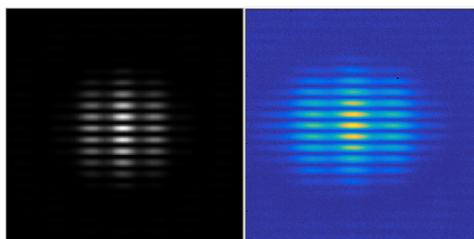


Рис. 15 – Промоделированная интерференционная картина (слева) и полученная на PETRA III (справа) при одинаковой геометрии щелей.

В результате первых измерений минимальные полученные значения поперечных размеров и эмиттанса приведены в таблице 3. В это же время производились измерения тех же параметров системами диагностики, уже введенными в эксплуатацию на накопителе PETRA III: 1-D интерферометр для вертикального размера и камера-обскура для горизонтального. Результаты этих измерений представлены в таблице 4. Все значения - усредненные по 100 последовательным измерениям.

Таблица 3 – Первые полученные с 2-D интерферометра результаты.

	Вертикальный	Горизонтальный
Размер пучка	20 мкм	180 мкм
Эмиттанс	32 пм рад	1.2 нм рад

Таблица 4 – Результаты систем диагностики, уже использующихся на накопителе
PETRA III.

	Вертикальный	Горизонтальный
Размер пучка	10 мкм	180 мкм
Эмиттанс	16 пм рад	1.2 нм рад

Наблюдения за работой интерферометра показали, что увеличенный вертикальный размер является следствием колебаний интерференционной картины. На рисунке 16 показаны три последовательно запечатленные интерферограммы. Все они сдвинуты друг относительно друга. Из-за таких сдвигов интерференционная картина размывается, минимумы становятся выше, и, как следствие, измеряется увеличенный размер.

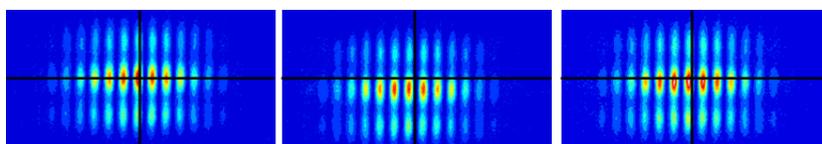


Рис. 16 – Колебания интерференционной картины.

Были проведены измерения частоты колебаний с помощью сфокусированного синхротронного излучения, которые показали две основные частоты колебаний - 20 Гц и 1.69 кГц. Полученные результаты позволят выяснить источник и устранить данные колебания. В диссертации предложен метод для искусственного подавления влияния колебаний в процессе получения и обработки изображения, основанный на программном совмещении максимумов интерферограмм по двум направлениям. В результате были получены результаты, показанные в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты измерений 2-D интерферометра.

	Вертикальный	Горизонтальный
Размер пучка	15.5 мкм	180 мкм
Эмиттанс	20 пм рад	1.2 нм рад

На данный момент 2-D интерферометр успешно эксплуатируется операторами ускорителя.

Далее были проведены экспериментальные исследования методов «затемнения» и поворота щелей. Экспериментальные исследования показали полное согласие с моделированием. Использованный светофильтр, специально созданный для этой цели в DESY, показал, что фазовая задержка «затемненной» апертуры отличается от задержки в «открытой» апертуре. Сле-

довательно для 2-D интерферометрии требуются разработка и изготовление нового «нейтрального» фильтра для дальнейших исследований.

В Заключении приведены основные результаты работы:

1. Предложен метод диагностики поперечного профиля электронного и гамма пучка МэВ-ных энергий при помощи излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого в оптических фиберах. В экспериментах, проведенных на ускорителях МИ-6 и СЛ75-5-МТ с энергией 6 МэВ, показана возможность применения предложенной схемы диагностики. Предложенный метод может применяться для контроля большеразмерных дозовых полей, к примеру медицинских ускорителей, где необходимо измерять дозовые поля размерами от 0.5×0.5 до 40×40 см.
2. На основе библиотеки Synchrotron Radiation Workshop был написан универсальный код, позволяющий моделировать различные геометрии 2-D интерферометра и новые методики интерферометрии. Результаты моделирования с помощью данного кода были подтверждены экспериментально.
3. Разработан 2-D интерферометр синхротронного излучения на ускорителе PETRA III, который был создан, откалиброван и запущен в эксплуатацию.
4. На созданном интерферометре испытаны методы улучшения пространственного разрешения. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными моделирования.
5. Результаты испытания фильтров для «затемнения» щелей интерферометра, которые были специально изготовлены в DESY, показали необходимость доработки технологии изготовления.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в изданиях рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

- а *А.В. Вуколов, А.И. Новокшионов, А.П. Потылицын, С.Р. Углов / Диагностика электронных пучков по черенковскому излучению в оптоволокне // Изв. ВУЗов. Физика. – 2016. – Т. 59, № 10. – С. 140 – 144.*
- б *А.И. Новокшионов, А.П. Потылицын, Г. Кубе / 2-D интерферометрия синхротронного излучения для измерения поперечных размеров пучка электронов кольцевого ускорителя // Изв. ВУЗов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 4. – С. 112 – 118.*

c *A.V. Vukolov, A.I. Novokshonov, A.P. Potylitsyn, S.R. Uglov* / Electron beam diagnostics tool based on Cherenkov radiation in optical fibers // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2016. – V. 732.

Публикации в международных изданиях:

d *A.V. Vukolov, A.I. Novokshonov, A.P. Potylitsyn, E.N. Shuvalov, V.I. Bespalov, D.A. Shkitov* / Measuring of betatron collimated bremsstrahlung profile // Proc. of IPAC'16. – Busan, Korea: 2016. P. 258 – 260.

e *A.I. Novokshonov, A.P. Potylitsyn, G. Kube, M. Pelzer, G. Priebe* / Status of the two-dimensional synchrotron radiation interferometer at PETRA III // Proc. of IBIC'16. – Barcelona, Spain: 2016. P. 829 – 832.

f *A.V. Vukolov, A.I. Novokshonov, A.P. Potylitsyn, S.R. Uglov, E.N. Shuvalov* / Measurement of gamma beams profile by Cherenkov radiation in fibers // Proc. of RuPAC'16. – Saint-Petersburg, Russia: 2016. P. 638 – 640.

Тезисы докладов:

h *А.Е. Харисова, Д.А. Шкитов, А.И. Новокшонов, Я.Н. Сутыгина* / Сравнение результатов моделирования синхротронного излучения от поворотного магнита с экспериментальными данными / Тезисы XLVI международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 26 – 28 мая, 2015.

i *A.V. Vukolov, A.I. Novokshonov, A.P. Potylitsyn, S.R. Uglov* / Electron beam diagnostics tool based on Cherenkov radiation in optical fibers / Book of abstracts of XI international symposium RREPS-15, Saint-Petersburg, September 6 – 11, 2015 // Tomsk: TPU Publishing House – 2015 – P. 100.

j *A.V. Vukolov, A.I. Novokshonov, A.P. Potylitsyn, E.N. Shuvalov, V.I. Bespalov, D.A. Shkitov* / Optical Fibers as a Tool for Gamma Beam Diagnostics at Medical Electron Accelerators / Abstracts of IPAC-16, Busan, Korea, May 8 – 13, 2016.

k *A.V. Vukolov, A.I. Novokshonov, A.P. Potylitsyn, E.N. Shuvalov, V.I. Bespalov, D.A. Shkitov* / Status of the Two-Dimensional Synchrotron Radiation Interferometer at PETRA III / Abstracts of IBIC-16, Barcelona, Spain, September 11 – 15, 2016.

Список литературы

1. *C. Steinbach, van M. Rooij* A Scanning Wire Beam Profile Monitor // *Proc. of IEEE conf.* – 1987. – Pp. 1920 – 1922.

2. *D.A. Low* Dosimetry Tools and Techniques for IMRT / *D.A. Low, J.M. Moran, J.F. Dempsey et al.* // *J. Med. Phys.* – 2011. – Vol. 38. – Pp. 1313 – 1338.
3. *P. Shiapparelli* Total skin electron therapy: A reimplementaion using radiochromic films and IAEA TRS-398 code of practice / *P. Shiapparelli, D. Zefiro, F. Massone, G. Taccini* // *J. Med. Phys.* – 2010. – Vol. 37. – Pp. 3510 – 3517.
4. *S. Wu, G. Andonian, T. Campese et al.* Transverse Beam Profile Diagnostics Using Fiber Optic Array // *Proc. of IPAC'13* – 2013. – Pp. 1205 – 1207.
5. *T. Mitsuhashi, S. Hiramatsu, H. Iwasaki et al.* Beam Profile and Size Measurement by SR Interferometers // *Proc. of PAC'99* – 1999. – Pp. 492 – 494.
6. *M. Masaki, S. Takano* Beam Size Measurement of The SPRING-8 Storage Ring by Two-Dimensional Interferometer // *Proc. of DIPAC'01* – 2001. – Pp. 142 – 144.
7. *Руководство по кремниевому ФЭУ Sensl MicroSB* - <http://sensl.com/downloads/ds/DS-MicroJseries.pdf>.
8. *Основные параметры ускорителя СЛ75-5-MT* - <http://www.niiefa.spb.su/site/right/medicine/radio/sl75-5-mt/?lang=ru>.
9. *Руководство по дозиметру UNIDOS E* - http://www.ptw.de/unidos_e_dosemeter_ad0.html?&cId=4017.
10. *PTW 30013 ionization chamber page* - http://www.ptw-usa.com/waterproof_farmer_chamber0.html.
11. *M. Born, E. Wolf* Principles of Optics – New York: Pergamon Press Ltd., 1980.
12. *L. Torino, U. Iriso* Limitations and Solutions of Beam Size Measurements via Interferometry at ALBA // *Proc. of IPAC'15* – 2015. – Pp. 428 – 430.
13. *Страница разработчика SRW* - <https://github.com/ochubar/SRW..>
14. *JAI Web Page* - <http://www.jai.com/en/products/bm-141ge..>
15. *M.J. Boland, T. Mitsuhashi, T. Naito, K.P. Wootton* Intensity Imbalance Optical Interferometer Beam Size Monitor // *Proc. of IBIC'12* – 2012. – Pp. 566 – 568.
16. *L. Torino, U. Iriso* Beam Shape Reconstruction Using Synchrotron Radiation Interferometry // *Proc. of IBIC'16* – 2016.