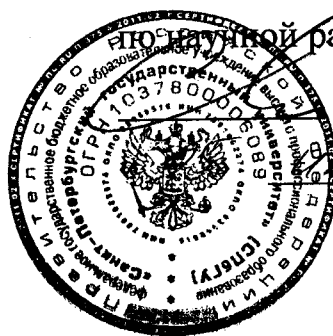


**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор Санкт-Петербургского  
государственного университета



Туник С.П.

2014 г.

## **ОТЗЫВ**

ведущей организации

Санкт-Петербургского государственного университета

на диссертацию Бондаренко Тараса Владимировича «Источники терагерцового и узкополосного рентгеновского излучения с использованием электронных сгустков большой яркости», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Диссертация Бондаренко Т.В. посвящена разработке источников электромагнитного излучения с использованием релятивистских электронных сгустков, обладающих высокой яркостью. В частности рассматриваются источники излучения терагерцового диапазона частот и источник рентгеновского излучения, обладающий узким энергетическим спектром с возможностью перестройки энергии.

Актуальность темы диссертации обуславливается активными разработками компактных источников мощного терагерцового излучения и способов получения квазимонохроматических источников рентгеновского излучения с перестраиваемой энергией, которые проводятся во многих научных центрах мира.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении автор описывает цели, обосновывает актуальность работы, представляет

основные положения, выносимые на защиту, а так же дает краткое описание содержания диссертации.

В первой главе диссертации приведена общая принципиальная схема установки для генерации мощного излучения терагерцового диапазона частот, основанная на использовании пикосекундного релятивистского электронного пучка и излучающего черенковского капилляра. Приведены основные параметры ключевых узлов установки и предъявлены требования, предъявляемые к ним. Кратко изложены характеристики фотокатода, лазерной системы и системы СВЧ питания. Более подробно рассмотрены параметры ускоряющей системы, основанной на двух секциях: фотоинжекторе в качестве первой секции и резонаторе бегущей волны и бипериодической ускоряющей системе в качестве второй секции.

Вторая глава полностью посвящена анализу динамики электронного пучка в разработанных автором ускоряющих структурах. Так, в начале главы идет описание программы BEAMDULAC-BL, с помощью которой производится анализ динамики электронов, затем непосредственно приводятся данные, полученные в результате анализа. Программа разработана для исследования динамики электронов в четырех типах ускоряющих структур: с бегущей и стоячей типом волны при положительной и отрицательной дисперсии. При моделировании также учитывалось влияние пространственного заряда пучка и эффекта нагрузки током на динамику, что крайне важно, принимая во внимание тот факт, что импульсный ток пучка составляет десятки ампер. Стоит отметить, что стандартные программы для исследования динамики заряженных частиц в ускорителях не позволяют корректно учитывать нагрузки током пучка. Анализ влияния пространственного поля пучка производился с помощью разбиения заряда методом крупных частиц «Cloud in Cell» на сетке. Анализ динамики электронного пучка производится как с использованием гладких функций аппроксимации ускоряющего поля в ускоряющих структурах, так и с помощью задания электродинамических параметров каждой ускоряющей ячейки структуру в отдельности. Приводятся результаты, показывающие, что ускоряющие структуры могут быть использованы для ускорения пикосекундных пучков

электронов с импульсными токами до 20 А до энергий 5 МэВ и выше при мощности системы СВЧ питания каждой из секций, равной 2,5 МВт.

В третьей главе описывается излучающая система генератора терагерцового излучения: черенковская замедляющая структура и излучающая рупорная антенна. Приводятся аналитические зависимости, используемые автором для оценки мощности генерируемого терагерцового излучения. В качестве замедляющей черенковской структуры используются гофрированный капилляр и капилляр, покрытый диэлектриком. В обоих случаях радиус апертуры капилляра является субмиллиметровым. Мощность, наводимая пучком электронов с параметрами, полученными во второй главе диссертации, достигает сотен кВт при КПД более 1%. Для управления направленностью наведенного электромагнитного излучения автором была исследована геометрия рупорных антенн круглого и прямоугольного сечения, непосредственно присоединяющихся к открытому концу капилляра. Показано, что с помощью использования антенн возможно достижение направленности излучения превышающей 20 дБ и коэффициента отражения антенн ниже -20 дБ.

В четвертой главе рассматривается источник узкополосного рентгеновского излучения для ангиографии с возможностью перестройки энергии. Автором впервые предлагается принципиальная схема источника, которая позволяет генерировать узкополосное рентгеновское излучение с возможностью перестройки энергии в широких пределах, что является важным свойством для использования в ангиографии. Установка включает в себя линейный ускоритель электронов на энергию 20-30 МэВ, кристаллическую мишень, поликапиллярную отклоняющую рентгеновскую структуру, магнит, используемый для отклонения электронного пучка и вспомогательные элементы, такие как гониометр. Рентгеновское излучение излучается в процессе каналирования электронов в кристаллической мишени. Для фильтрации высокоэнергетического тормозного излучения, возникающего в кристаллической мишени, автором предложено использование поликапиллярной рентгеновской оптики, обеспечивающей эффективность передачи излучения с энергией ниже 40 кэВ на уровне 40%. Приводится описание разработанной программы BEAMDULAC-CR, использованной для анализа динамики электронов в кристаллах. Программа

основывается на классическом рассмотрении движения электронов в поперечном потенциальном поле кристалла. Программа позволяет так же рассчитать спектр генерируемого излучения при каналировании, анализируя поперечные колебания частиц внутри каналов кристалла. Автором получено значение пика интенсивности излучения при каналировании на энергиях близких пику поглощения йодного контрастного вещества (33 кэВ), применяемого в ангиографии при использовании электронного пучка с энергией 21-23 МэВ. Показано, что ширина спектра излучения позволяет использовать такой тип излучения в медицинских приложениях. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными результатами, полученными в ускорительных центрах, показало корректность результатов, полученных с помощью программы BEAMDULAC-CR. Автором также определены дозовые нагрузки, получаемые тканеэквивалентным фантомом при облучении предлагаемым типом источника. Благодаря узкополосности спектра и точному расположению максимума интенсивности излучения относительно соответствующего максимум коэффициента поглощения йодного контраста, контрастность изображения при использовании предлагаемого источника рентгеновского излучения контрастного вещества в фантоме увеличивается в три раза по сравнению с медицинской рентгеновской трубкой, работающей при напряжении 100 кВ.

В заключении приведены основные результаты диссертации. Главным достижением работы является предложение оригинальной концепции генератора ТГц излучения с физическим обоснованием и детальной проработкой схемы всего комплекса.

Практическая значимость научной работы заключается в техническом решении по реализации генератора электромагнитного излучения ТГц диапазона частот, который может быть использован в прикладных целях, таких как, к примеру, терагерцовая интроскопия. В ходе выполнения работы автором исследовано большое количество различных вариантов излучающих капилляров и антенн, проведено обобщение и анализ результатов их моделирования. Так же автором впервые предложена схема получения узкополосного перестраиваемого источника рентгеновского излучения, которая может быть внедрена в области

медицинской рентгенографии. Работа является целостной и выполнена на высоком научном уровне.

В работе имеются некоторые недостатки. При анализе динамики электронов в ускоряющей структуре генератора ТГц излучения не рассматривался вопрос оптимизации расходимости и поперечного размера пучка на входе в капиллярную излучающую структуру и его коллимации. Этот вопрос технически важен, учитывая тот факт, что диаметр капилляра и диаметр пучка электронов являются соизмеримыми. Другой недостаток – предложение магнетронной системы питания ускоряющей структуры, в то время, как лучше было бы использовать клистрон, вносящий меньшие нестабильности. Также имеются некоторые погрешности в записи формул. Так в формуле (1.5) вместо  $b$  следует писать  $i$ . Однако указанные недостатки не снижают значимости работы и ценности проведенных исследований.

### Заключение

Работа была представлена на заседании кафедры теории систем управления электрофизической аппаратурой СПбГУ 29 мая 2014 г. (протокол №5).

Работа отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, Бондаренко Тарас Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника за разработку схемы генератора мощного ТГц излучения и пакета программ для анализа динамики электронов в ускоряющих структурах и кристаллах.

Отзыв составил

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой теории систем управления электрофизической  
аппаратурой

Санкт-Петербургского государственного университета

198504 Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский просп., 35

8(812)428-47-29

e-mail: [dovs45@mail.ru](mailto:dovs45@mail.ru)



Овсянников Дмитрий Александрович

05.06.2014