

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Опариной Юлии Сергеевны «Методы повышения эффективности импульсных релятивистских электронных источников излучения терагерцового частотного диапазона», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 - Радиофизика в диссертационный совет 24.1.238.01 при Институте прикладной физики Российской академии наук

Диссертация Опариной Юлии Сергеевны посвящена разработке методов повышения эффективности генерации излучения релятивистских электронных сгустков в ондуляторах и системах на основе циклотронного резонанса. Ключевая новая идея, предложенная и рассмотренная в ходе работы над диссертацией, состоит в обосновании возможности повышения эффективности генерации за счет использования когерентного спонтанного излучения коротких сгустков (1 пс и короче), причем предполагается специально вносить предварительную модуляцию продольного распределения плотности заряда в сгустке для повышения эффективности излучения. Альтернативным подходом, также рассмотренным в диссертации, является использование надразмерных резонаторов с возбуждением в них волн Тальбо типа сгустком относительно большой длительности. С помощью теоретического анализа и численного моделирования показано, что эффективность генерации излучения предварительно промодулированного сгустка электронов может превышать 10 % для ондулятора. Для надразмерного резонатора показана возможность увеличения эффективности генерации до 6 %.. Это в несколько раз выше, чем для традиционно используемых для генерации излучения сгустков с распределением плотности заряда, близким к Гауссову. Идея использования предварительно промодулированного электронного сгустка в различных системах генерации излучения является новой, методы аналитического исследования процессов генерации были адаптированы для данного класса задач, что подтверждает научную новизну диссертации.

Задача повышения эффективности генерации когерентного излучения слаборелятивистскими пучками электронов, особенно в новых частотных диапазонах – субмиллиметровом и терагерцовом, остается в настоящее время одной из основных для радиофизики и физики ускорителей. Используемые в настоящее время генераторы с черенковскими излучающими системами, генераторы, основанные микроондуляторах, системы для генерации переходного излучения или излучения Смита-Парсела, имеют КПД генерации не более нескольких процентов, хотя и позволяют получать пиковую

мощность до единиц МВт. Предлагаемые в диссертации Ю.С. Опариной методы повышения эффективности излучения в 5-10 раз, несомненно, являются актуальными.

Необходимо отметить, что предварительная премодуляция сгустков электронов, как показано в диссертации, позволяет повысить эффективность генерации излучения в суб-мм и ТГц диапазонах. Однако очевидно, что это решение позволяет также снизить жесткость требований, предъявляемых к параметрам электронных сгустков. Это, в свою очередь, может позволить в будущем значительно снизить требования к стабильности, пространственно-временному распределению и джиттеру лазерных импульсов, используемых в фотопушках. Повышение эффективности генерации излучения и упрощение ускоряющей системы, несомненно, являются перспективными путями к практическому внедрению результатов, полученных в ходе работы над диссертацией. Полученные результаты имеют несомненную практическую ценность для подготовки новых экспериментов по генерации излучения ТГц и суб-мм диапазонов.

В диссертации последовательно и логично обосновывается новый подход к повышению эффективности спонтанной когерентной генерации излучения. Описывается использованный для исследования процесса премодуляции плотности заряда релятивистского сгустка и генерации излучения математический аппарат. Результаты аналитического исследования проверяются с помощью численного моделирования. Таким образом, обоснованность положений и выводов, описанных в диссертации, не подвергается сомнению.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием хорошо проработанных математических моделей, являющихся дальнейшим развитием теории спонтанного когерентного излучения, а также проверенных, в том числе с помощью последующего эксперимента, пакетов программ.

Апробация работы выполнена при представлении докладов на основных российских и международных конференциях по системам генерации излучения, нелинейной динамике и радиофизике. В ходе работы над диссертацией опубликовано 13 статей в журналах и ещё более 20 работ в трудах конференций, что существенно превышает средний результат соискателей ученой степени кандидата наук.

Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников. Во введении сформулированы актуальность, научная новизна, практическая ценность работы, приведены положения, выносимые на защиту.

Первый раздел диссертации посвящен описанию спонтанного когерентного излучения, генерируемого короткими плотными релятивистскими сгустками электронов.

Отмечено, что возможность возвращения к вопросам генерации данного типа излучения возникла относительно недавно с развитием фотопушек. При энергии электронов, составляющей несколько МэВ, в ондуляторных системах будет генерироваться излучение в суб-мм и ТГц диапазонах. Подробно рассматривается влияние группировки / дегруппировки электронов в процессе движения в ондуляторе и испускания ими фотонов на эффективность и параметры излучения. Рассматриваются методы «замораживания» параметров электронного сгустка. Описан эффект продольной компрессии сгустка при излучении и способ стабилизации длины сгустка, основанный на эффекте отрицательной массы в ондуляторе. Показано, что эффективность ондуляторного излучения может превышать 10 %. Также вопросы стабилизации параметров электронного сгустка рассмотрены применительно к генераторам циклотронного типа.

Во втором разделе диссертации рассматриваются многоволновые (двухволновые) режимы генерации ондуляторного излучения. Изучены два режима генерации: спонтанное излучение в относительно длинноволновом диапазоне и излучение от промодулированного сгустка электронов. В первом режиме повышение эффективности генерации достигается за счет дополнительной группировки пучка в поле собственной волны. Во втором случае предлагается использовать ондулятор с большим периодом поля для возмущения распределения заряда в сгустке, а затем генерировать излучение с большой интенсивностью во втором ондуляторе с коротким периодом. Также рассмотрен двухволновой режим генерации в источниках циклотронного типа.

Третий раздел посвящен исследованию возможности селективного возбуждения высокочастотного вида колебаний в надрезонансном резонаторе. Описан принцип работы сильноточного мазера на свободных электронах, построенного на основе надрезонансного резонатора. Рассмотрено несколько типов резонаторов, имеющих разную геометрию. Проведена оценка параметров возможного мощного МСЭ. Рассмотрена конкуренция видов колебаний в резонаторах различных типов и возможность подавления низших видов.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Основные новые научные результаты, полученные Ю.С. Опариной в ходе работы над диссертацией, следующие:

- предложена и обоснована возможность повышения эффективности излучения при использовании предварительно промодулированных коротких электронных сгустков в ондуляторах и системах на циклотронном резонансе;

- показана возможность стабилизации длины сгустка или его компрессии в процессе излучения;
- показано, что с использованием протяженных сгустков электронов возможна генерация многомодового излучения в ондуляторах и системах на циклотронном резонансе;
- обоснована возможность селективного возбуждения высокодобротного вида колебаний протяженным электронным сгустком в надрезонансном резонаторе.

Диссертация не лишена некоторых недостатков:

1. Некоторые важные термины в диссертации не введены, хотя и требуют этого: «эффективность излучения» и «электронный КПД», «групповой синхронизм», «проскальзывание» сгустка относительно максимума излучения, «устойчивая нейтральная фаза волны», «режим отрицательной массы» в ондуляторе, «силовая группировка» и т.д. В нескольких местах применяются неканонические определения без пояснения необходимости использования («тяжелые электроны», «правильный сдвиг фазы», «основной центральный цикл волны», «вспомогательные волны», «умножение волнового пучка», «спектры ... похожие на идеальную синусоидальную структуру» и т.д.).

2. В подразделе 1.1 рассматривается излучение сгустка электронов в системе, представляющей собой комбинацию поперечного магнитного ондулятора и круглого волновода. Рассматривается возбуждение в волноводе низшей TE_{11} моды. Обоснование возбуждения именно этой моды при спонтанном когерентном излучении в ондуляторе не приведено, не рассмотрены ограничения на групповую скорость волны и длину волны излучения.

3. На с. 35 приведено сверхкраткое описание программы KARAT (хотя для оценки многих результатов моделирования хотелось бы видеть более подробное описание возможностей данной программы, а также и описание программы WB3D), использовавшейся для проверки результатов аналитического исследования с помощью численного моделирования. Утверждается, что программа основана на «прямом Particle-in-Cell решении уравнений Максвелла». Из данного утверждения непонятно, как программа учитывает влияние внешних и собственных полей (приближение заданного движения или самосогласованно?) и возможен ли учет запаздывания собственного потенциала, что может оказать критическое влияние на результаты моделирования процессов при излучении.

4. Ни в одном из разделов диссертации не рассматривается подробно влияние параметров электронного сгустка или внешних полей на параметры генерируемого излучения, степень компрессии сгустка и т.д. Не приведены требования к длительности сгустка, его энергетическому спектру, стабильности параметров и т.д. В большинстве из разделов приведены результаты численного моделирования только для одного набора параметров сгустка и внешних полей, только в нескольких подразделах приведены зависимости для двух-трех значений заряда в сгустке. Влияние поперечного эмиттанса сгустка вообще не рассматривается. Также не рассматривается возможность генерации в ондуляторе высших гармоник излучения при использовании предварительно промодулированного сгустка.

5. На с. 39 приведено утверждение, обосновывающее результат численного моделирования, показанный на рисунке 1.16. Утверждается, что увеличение полного заряда в пучке (корректнее – в сгустке, многосгустковый режим генерации не рассматривается) приводит к уменьшению области взаимодействия электронов с собственным полем и повышению эффективности взаимодействия. Данный результат получен численно, аналитически не подтвержден. Оценка полной мощности излучения более короткого и плотного сгустка и ее сравнение с мощностью более длинного и менее плотного не проведена.

6. На с. 51 рассматриваются особенности движения сгустка в фазовом пространстве и утверждается, что в определенных фазах колебаний сгусток распадается на два. Данное утверждение не совсем корректно, так как полного физического разделения не происходит. Физические процессы в данном случае те же, что приводят к развитию обменной неустойчивости и эффекта Тушека в ускорителях, однако из-за однократного взаимодействия с полем ондулятора неустойчивость не успевает полностью развиться. Кроме того, отсутствие описания программы, в которой проводилось численное моделирование для данного случая, не позволяет оценить корректность полученного результата. Непонятно, позволяет ли использованная модель учитывать высокочастотную составляющую собственных полей с учетом граничных условий или только квазистатическую компоненту. Во втором случае полученный результат некорректен.

7. В разделе 1.3 подчеркивается, что увеличение геометрической длины сгустка не приводит к увеличению его фазовой длины. Это очевидно, так как волна в данном случае является поперечной. Однако интересно было бы рассмотреть случай, когда длина сгустка будет приближаться к периоду осцилляций.

8. Полученные результаты аналитического исследования и численного моделирования представляют несомненный интерес для практического применения.

Однако в диссертации с точки зрения экспериментального применения рассматриваются только МСЭ (подраздел 3.1.3). Рекомендации по практическому использованию ондуляторного режима генерации излучения модулированных сгустков электронов или режима генерации с двумя ондуляторами не сформулированы.

Перечисленные выше результаты подтверждают, что диссертация Ю.С. Опариной является законченной научно-квалификационной работой. Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, являются достаточно весомыми и соответствуют требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Содержание диссертации соответствует паспорту заявленной специальности. Автореферат корректно и в полной мере отражает содержание и результаты диссертации. Основные результаты диссертации полно отражены в публикациях. Приведенные выше недостатки не снижают качества выполнения работы.

Таким образом, диссертация Юлии Сергеевны Опариной на тему «Методы повышения эффективности импульсных релятивистских электронных источников излучения терагерцового частотного диапазона» представляет собой законченную работу, обладающую всеми необходимыми признаками научной новизны, актуальности, научной и практической ценности, имеющую существенное научное и прикладное значение в области генерации ондуляторного и циклотронного излучения и нелинейной динамики. Работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а Опарина Юлия Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, доцент,

профессор Отделения лазерных и плазменных технологий Офиса образовательных программ Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

115409, г. Москва, Каширское шоссе д. 31,

Полозов Сергей Маркович



Подпись: ЗАВЕРЯЮ
ЗАМ. ДИРЕКТОРА ПО
ПЕРСОНАЛУ НИЯУ МИФИ
Л. В. Васильченко

Контактные данные:

тел. +7 495 7885699*9940, e-mail: smpolozov@mephi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Адрес места работы:

115409, г. Москва, Каширское шоссе д. 31,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт лазерных и плазменных технологий

Я, Полозов Сергей Маркович, выражаю свое согласие на обработку персональных данных, связанных с защитой.

Подпись доктора физико-математических наук, доцента, профессора ОЛТП ООП НИЯУ МИФИ Полозова Сергея Марковича заверяю:



18 ноября 2021г.

Приложение:

{Список научных трудов за последние 5 лет}

- 1 Ю.А. Башмаков, Т.В. Бондаренко, С.М. Полозов Генерация излучения в рентгеновском диапазоне при плоскостном каналировании релятивистских электронов в кристаллах, Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 7, с. 118-123
- 2 Т.В. Бондаренко, С.М. Полозов, А.П. Сумбаев Расчёт влияния нагрузки током ускоряющей структуры в ускорителе ЛУЭ-200, Письма в «Журнал «Физика Элементарных частиц и атомного ядра», №7, 2016, Т. 13, № 7 (205), с. 1432-1437
- 3 S.M. Polozov, V.I. Rashchikov Longitudinal motion stability of electrons inside the plasma channel of LPWA, Cybernetics and Physics, VOL. 7, NO. 4, 2018, 228–232
- 4 I.A. Ashsnin, Yu.A. Bashmakov, S.M. Polozov et al. Conceptual design of a dedicated fourth-generation Specialized Synchrotron radiation Source (SSRS-4) at the Kurchatov Institute, Physics of Atomic Nuclei. 2018. Vol. 81, No. 11, p. 1646-1651
- 5 И.А. Ашанин, Ю.Д. Ключевская, С.М. Полозов и др. Динамика пучка в линейном ускорителе-инжекторе Специализированного источника синхротронного излучения 4го поколения ИССИ-4, Вестник Санкт-Петербургского университета: Прикладная Математика. Информатика. Процессы управления, 2019, т.15, вып. 1, с. 126-139
- 6 Л.В. Григоренко, Б.Ю. Шарков, С.М. Полозов и др. Научные задачи перспективного ускорительно-накопительного комплекса DERICA для исследования радиоактивных изотопов, УФН, 189, № 7, с. 721–738, 2019
- 7 A. Abada, M. Abbrescia, S.M. Polozov et al. FCC Physics Opportunities, European Physical Journal C 79(6):474
- 8 A. Abada, M. Abbrescia, S.M. Polozov et al. FCC-ee: The Lepton Collider, The European Physical Journal Special Topics 228(2):261-623
- 9 A. Abada, M. Abbrescia, S.M. Polozov et al. FCC-hh: The Hadron Collider, The European Physical Journal Special Topics 228(4):755-1107
- 10 M. Schwarz, S. Yaramyshev, S. Polozov Reference beam dynamics layout for the SC CW heavy ion HELIAC at GSI, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 6 Volume 951, 152044, 2019,
- 11 V.S. Dyubkov, T.A. Lozeeva, S.M. Polozov et al. Current progress on ion driver LINAC-100 development for the new rare isotope facility DERICA at JINR, Physica Scripta, 2020 Vol. 95, No. 8, 084006
- 12 S.M. Polozov, V.I. Rashchikov Simulation studies on the radiofrequency gun saturated emission, Yu. D. Kluchevskaia, S.M. Polozov Cybernetics and Physics, 2020 Vol. 9, No. 2, pp. 103-106
- 13 Beam dynamics simulation in a linear accelerator for CERN future circular collider, Cybernetics and Physics, 2020 Vol. 9, No. 2, pp. 98-102
- 14 D. Bychanok, A. Sukhotski, S.M. Polozov et al. Electromagnetic properties control during prototyping, fabrication and operation of low- β 325 MHz half-wave resonators, Journal of Physics D Applied Physics 54 (25), 255502, 2021



18.11.2021.