

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Опариной Ю. С.

«МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА»

Компактные импульсные источники, работающие в частотном диапазоне нескольких терагерц, востребованы в ряде приложений. Естественный путь реализации источника мощных импульсов – использование сильноточного релятивистского электронного пучка или плотного электронного сгустка. В диссертации рассматривается излучение таких источников излучения в терагерцовом диапазоне и исследуются возможности преодоления проблем, связанных с индуцированным излучением, модовой селективностью излучения и др. проблем, связанных с использованием плотных рабочих электронных пучков и с особенностями электронно-волнового взаимодействия в рассматриваемых источниках излучения.

Диссертация состоит из трёх глав. Первые две главы посвящены излучению коротких сгустков, длины сравнимой с длиной волны излучения, а в третьей главе речь идёт об излучении относительно протяжённых электронных сгустков. В первой главе получено значительное количество новых результатов и исследованы методы обеспечения и поддержания режима когерентного спонтанного излучения короткого сгустка. Актуальность исследований в данной главе определяется современным уровнем фотоинжекторной техники, способной производить электронные сгустки с пикосекундной длительностью и большими плотностями заряда. Когерентное спонтанное излучение таких сгустков можно организовать в терагерцовом и субтетагерцовом частотных диапазонах. В процессе излучения в спонтанном режиме возникает проблема сохранения фазового размера сгустка (то есть его достаточной компактности в пространстве фаз электронов относительно излучаемой волны). Автором описан новый и достаточно неожиданный физический эффект – компрессия короткого электронного сгустка собственным полем когерентного спонтанного ондуляторного излучения (ОИ). Этот эффект интересен не только с точки зрения решаемой в работе конкретной задачи генерации субтерагерцового

излучения короткими электронными сгустками, но он имеет самостоятельную значимость. В первой главе рассмотрено также ОИ в ондуляторе с ведущим магнитным полем в так называемом режиме отрицательной массы частиц, когда дополнительная стабилизация размеров сгустка обеспечивается кулоновским взаимодействием внутри него. Автором описан также эффект компенсации кулоновского расталкивания в процессе спонтанного циклотронного излучения коротких электронных сгустков.

Во второй главе речь идет об излучении фотоинжекторных сгустков, близком к спонтанному. Исследуется излучение в случае, когда длина электронного сгустка слегка превосходит рабочую длину волны. Показано, что в этом случае может быть обеспечена эффективная генерация вспомогательной низкочастотной волны в режиме спонтанного когерентного излучения. Автором продемонстрировано, что эта вспомогательная низкочастотная волна может способствовать более эффективной генерации рабочей высокочастотной волны. Например, вспомогательная волна может обеспечить компрессию электронного сгустка, что, в свою очередь, может обеспечить генерацию этим сгустком высокочастотной волны в режиме спонтанного излучения. Автор теоретически предсказывает высокую эффективность такой генерации с использованием каскадного двухволнового процесса. Кроме того, во второй главе рассмотрены процессы, в которых генерация вспомогательного низкочастотного излучения улучшает группировку зарядов относительно узлов высокочастотной волны в периодическом магнитном поле, и, как следствие, повышается эффективность электрон-фотонного взаимодействия на рабочей длине волны.

В третьей главе теоретически показана возможность использовать эффект Тальбо для организации селективной сверхразмерной системы электронного автогенератора терагерцового частотного диапазона с сильноточным пучком релятивистских электронов. Идея состоит в том, чтобы возбуждать в генераторе не одну рабочую моду системы, а набор мод (супермоду). Здесь же предложен метод разложения волновых полей супермод в резонаторах типа Тальбо по набору супермод. Проблема конкуренции разных супермод, одновременно возбуждаемых электронным пучком в резонаторе типа Тальбо на одной и той же частоте, решается в ситуации, когда стартовый ток в электронном генераторе превышен только для одной низшей супермоды.

Результаты исследований опубликованы в различных реферируемых научных журналах, в том числе с высокими рейтингами WoS: *Physical Review Applied*, *Applied Physics Letters*, *Physics of Plasmas*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, *Journal of Applied Physics*, а также в материалах крупных международных конференций.

Из недостатков работы отмечу следующие:

- Обилие специфических терминов и определений, понятных специалистам в узкой области исследований и не расшифрованных в диссертации.
- Наличие заметного количества опечаток, иногда некорректное цитирование литературы и некоторые явные опечатки в номерах ссылок, а также пропуск слов, несогласований и т.п.
- Для теоретического исследования желательно иметь сравнение полученных результатов с данными измерений на какой-либо установке; таковые не приводятся.
- Результаты численного моделирования получены при параметрах пучков с заданной энергией и длительностью банчей без указания разброса энергий, эмиттанса и других характеристик. Необходимо пояснить, на каких основаниях этим пренебрегается, если это так, и является ли это приближение модельным для идеального пучка или реальным в действующих установках.
- В связи с пунктом выше, учитывая, что не заявлены потери и, по-видимому, рассматривается идеальный пучок, возникают вопросы к полученному в первой и второй главах теоретическому предсказанию эффективности для источников излучения с КПД 20 % и более, и к другим оценкам.
- Насколько можно судить, расчет ведется в упрощенной квазианалитической модели, и не вполне ясно, как влияет на результаты усложнение расчетных моделей и их приближение к экспериментальным реалиям с учётом замечаний в двух вышестоящих пунктах.
- В работе, видимо, изначально по определению рассматривается случай слаборелятивистских электронов с лоренц-фактором $\gamma \sim 7-10$. Не очевидно, где и как в расчетах использовался этот факт слаборелятивистского приближения и чем, кроме реальных приложений и терагерцового диапазона излучения, ограничено значение γ -фактора. Если полученные теоретические

результаты справедливы только для слаборелятивистских зарядов, то нужно указать и обосновать предел энергий, где полученные эффекты значимы.

- В связи с предыдущим пунктом возникает вопрос о возможности применения использованного метода для релятивистских пучков с большей энергией и излучения на более высоких частотах. Естественным для теоретической работы представляется анализ исследованных эффектов в областях более высоких и низких энергий и возможности появления других эффектов в этих случаях.

Указанные выше недостатки не влияют на общую высокую оценку диссертации. Основные ее результаты получены автором лично, являются достаточно весомыми, и соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Содержание диссертации соответствует паспорту заявленной специальности. Автореферат в полной мере отражает содержание и результаты диссертации. Основные результаты диссертации полно отражены в публикациях. Диссертация Ю. С. Опариной представляет собой законченную работу, обладающую всеми необходимыми признаками научной новизны, актуальности, научной и практической ценности. Диссертация соискателя Опариной Юлии Сергеевны полностью соответствуют требованиям, установленным Положением о присуждении учёных степеней №842, соответствует выбранной специальности 1.3.4 – Радиофизика, а ее автор, Опарина Ю. С., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

Жуковский Константин Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2).

Контактные данные:

тел. +7 916 572 59 92, e-mail: zhukovsk@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.02 - *теоретическая физика*

Адрес места работы:

г. Москва, 119991, Ленинские горы, д. 1, стр. 2,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», физический факультет.

Я, Жуковский Константин Владимирович, выражаю свое согласие на обработку персональных данных, связанных с защитой.

Доктор физико-математических наук
профессор


(подпись)

К. В. Жуковский

(расшифровка подписи)

«30» ноября 2021 г.

Декан физического факультета
МГУ имени М. В. Ломоносова
профессор



Н. Н. Сысоев

(расшифровка подписи)

Приложение:

{Список научных трудов за последние 5 лет}

1. Zhukovsky K., Analysis of the spectral properties of free electron lasers in X-RAY and other bands, *Radiation Physics and Chemistry*, **189**, 109698-109698, 2021.
2. Zhukovsky K.V. Analytical Account for Off-Axis Effects in X-Ray Radiation of Harmonics of Free-Electron Lasers. *Russian Physics Journal*, **64**, №1, 23-32, 2021.
3. Zhukovsky K. Corrigendum to “Analytical account for the off-axis effects and undulator field harmonics in FELs” [*Opt. Laser Technol.* **131** (2020) 106311] *Optics and Laser Technology*, **143**, 107307, 2021.
4. Zhukovskii K.V. Harmonics Generation in Experiments with Free-Electron Lasers in the X-Ray Wavelength Range: A Theoretical Analysis. *Technical Physics*, **66**, № 3, 481-490, 2021.
5. Zhukovsky K., On the possibilities of amplification and radiation of harmonics in modern X-ray free electron lasers. *Optics and Laser Technology*, **143**, 107296-1-107296-8, 2021.
6. Zhukovsky Konstantin, Fedorov Igor, Spontaneous and Stimulated Undulator Radiation in Symmetric and Asymmetric Multi-Periodic Magnetic Fields. *Symmetry*, **13**, № 1, 135, 2021.
7. Zhukovsky K. Theoretical analysis of the radiation properties of some major x-ray free electron lasers, *Annalen der Physik*, **553** №11, 2100091-1-2100091-31, 2021.
8. Zhukovsky K. Theoretical spectral analysis of FEL radiation from multi-harmonic undulators. Corrigendum. *Journal of Synchrotron Radiation*, **28**, 667-668, 2021.
9. Zhukovsky K.V. Undulator and free-electron laser radiation with field harmonics and off-axis effects taken into account analytically. *Physics Uspekhi*, **64** № 3, 304-316, 2021.
10. Zhukovsky K. X-ray harmonic radiation in free electron lasers with variable deflection parameter of the undulators. *European Physical Journal Plus*, **136** № 7, 714, 2021.

11. Жуковский К.В. Излучение ондуляторов и ЛСЭ с аналитическим учетом гармоник поля и внеосевых эффектов. *Успехи физических наук*, **191** № 3, 318-330, 2021.
12. Жуковский К. Об излучении гармоник в рентгеновских лазерах на свободных электронах с изменяемым параметром дипольности ондуляторов. *Журнал технической физики*, **91** № 12, 1881-1894, 2021.
13. Zhukovsky K. Analysis of the Influence of Nonperiodic Magnetic Fields and Off-Axis Effects on the Radiation of X-Ray FEL and Other FELs. *Moscow University Physics Bulletin*, **75** № 4, 285-294, 2021.
14. Zhukovsky K. Analytical account for the off-axis effects and undulator field harmonics in FELs. *Optics and Laser Technology*, **131**, 106311-1-106311-13, 2021.
15. Zhukovsky Konstantin. Comparative analysis of the theoretical and experimental spectral properties of XFELs, *Results in Physics*, **19**, 103361, 2020.
16. Zhukovsky Konstantin. Corrigendum: Two-frequency undulator in a short SASE FEL for angstrom wavelengths, (2018 *J. Opt.* 20 095003). *Journal of optics*, **22** № 4, 049501, 2020.
17. Zhukovskii K.V., Kalitenko A.M. Generation of Coherent X-ray Harmonic Radiation in a Single-Pass Free-Electron Laser with Phase Shift of Electrons Relative to Photons, *Technical Physics*, **65** № 8, 1285-1295, 2020
18. Zhukovsky K., Oskolkov D. Modeling of heat transport and exact analytical solutions in thin films with account for constant non-relativistic motion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **150**, 119085, 2020.
19. Kalitenko A.M., Zhukovskii K.V. Radiation from Elliptical Undulators with Magnetic Field Harmonics. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, **130** № 3, 327-337, 2020.
20. Konstantin Zhukovsky. Synchrotron Radiation in Periodic Magnetic Fields of FEL Undulators—Theoretical Analysis for Experiments, *Symmetry*, **12**, 1258-1-1258-24, 2020.
21. Zhukovsky Konstantin Theoretical spectral analysis of FEL radiation from multi-harmonic undulators, *Journal of Synchrotron Radiation*, **27**, 1648-1661, 2020.

22. Zhukovsky K.V. Analysis of harmonic generation in planar and elliptic bi-harmonic undulators and FELs, *Results in Physics*, **13**, 102248, 2019.
23. Zhukovsky K.V. Effect of the third undulator field harmonic on spontaneous and stimulated undulator radiation, *Journal of Synchrotron Radiation*, **26**, 1481-1488, 2019.