

Применение метода зеркальных изображений для описания взаимодействия пучка с электромагнитным полем в ступенчатом периодическом волноводе без заполнения

С.Е. Розова¹, И.Л. Шейнман^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

² Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Рассмотрено применение метода зеркальных изображений для описания взаимодействия релятивистского пучка электронов со стенками планарного нерегулярного ступенчатого периодического волновода без заполнения. Сформулированы условия на геометрические параметры волновода и энергию, и угол влета пучка, обеспечивающие транспортировку пучка через волноводную структуру без значительных потерь частиц пучка из-за взаимодействия со стенками волновода. Результаты могут быть использованы для создания компактных ондуляторов для лазера на свободных электронах и фильтров для пучков заряженных частиц.

Ключевые слова: кильватерный ондулятор, ступенчатый периодический волновод без заполнения, метод зеркальных изображений

1. Введение

Идея использования ондуляторов для генерации электромагнитного излучения была предложена В. Л. Гизбургом в 1947 г. [1]. Его принцип основан на том, что периодически ускоряющаяся заряженная частица излучает электромагнитные волны, которые впоследствии могут быть использованы, например, для создания лазера на свободных электронах (ЛСЭ), предложенного в 1971 г. [2,3], исследования белковых структур или фотографирования фемтосекундных процессов.

Важнейшей частью конструкции лазера на свободных электронах является ондулятор – система, создающая периодическое движение частицы. В оригинальной конструкции ЛСЭ ондулятор представляет собой систему больших магнитов с чередующимися полярностями [4].

В связи со строительством в Новосибирске отечественного ускорителя СКИФ, тема разработки и совершенствования технологии лазеров на свободных электронах является актуальной [5]. Одно из важных направлений – создание новых инженерных систем ондуляторов и волноводов, которые позволили бы уменьшить размеры лазеров и увеличить их эффективность. Использование генерируемых сгустком собственных поперечных полей в микроволновом резонаторе для создания ондуляторного эффекта было предложено в [6]. Идея создания ондуляторов на основе пропускания пучка частиц через нерегулярные волноводы с периодическим заполнением (кильватерные ондуляторы) была предложена в [7-11]. В данной работе проводятся расчеты параметров одной из возможных систем с целью анализа ее применимости для создания компактного ондулятора.

2. Постановка задачи и методика

Рассматриваемая в качестве кильватерного ондулятора волноводная структура представляет собой две металлические ступенчатые пластины с периодом ступеней L , шириной ступеней a и расстоянием между пластинами $2R$ (см. рисунок). В структуру

под определенным углом влетает ускоренный пучок заряженных частиц. Под действием электромагнитных сил пучок притягивается к металлической стенке, а за счет периодичности структуры возникает периодическое смещение заряженных частиц, необходимое для получения ондуляторного излучения.

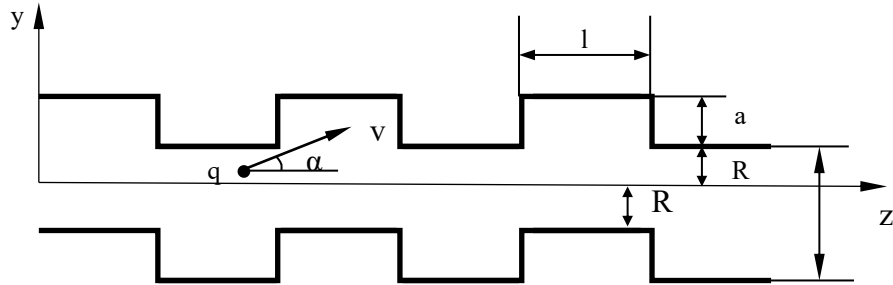


Рисунок 1. Схема волноводной структуры

В [12] подробно описано применение метода зеркальных изображений для нахождения точных двумерных аналитических выражений для электрического и магнитного полей и их потенциалов, создаваемых линейным пучком релятивистских заряженных частиц (заряженной нитью) между бесконечными проводящими плоскостями и ферромагнитными полюсами. Этот метод может быть использован для приближенного изучения динамики пучка в рассматриваемой структуре. Металлические стенки сектора волновода заменяются при расчетах на бесконечные плоскости. Такое приближение подходит для оценочных расчетов, однако не учитывает наличие вертикальных стенок волновода, а также конечные размеры сектора волновода и влияние соседних секторов на пучок.

В докладе будут представлены следующие результаты.

Получено уравнение траектории для пучка в кильватерной структуре в приближении полета около оси волновода. Траектория является периодичной, что подтверждает возможность использования ступенчатого волновода в качестве кильватерного ондулятора.

Записано условие связи для параметров системы (L , R , a , q , угол влета в структуру α), обеспечивающее возможность дальнего полета пучка. Нарушение этого условия приводит к отклонению пучка от устойчивой траектории и оседанию его частиц на стенке волновода. Это позволяет использовать структуру в качестве фильтра частиц по скорости и по углу влета. В то же время это условие осложняет использование структуры в качестве ондулятора, так как будет требоваться хорошая предварительная фокусировка пучка.

Получено выражение для ондуляторного коэффициента системы и его зависимость от геометрии и размеров структуры.

Записано условие применимости приближения полета, близкого к оси. Полученное неравенство накладывает ограничение на энергию пучка в зависимости от геометрических параметров волновода.

3. Заключение

Полученные результаты являются приближенными, однако показывают большой потенциал использования планарного нерегулярного ступенчатого периодического волновода без заполнения в качестве кильватерного ондулятора для лазера на

свободных электронах. Уточненные выражения можно получить, используя разложение поля по плоским электромагнитным волнам.

В дальнейших работах планируется изучение схожих систем с диэлектрическим заполнением, преимущество которых состоит в наличии излучения Вавилова-Черенкова, а также структур с гладкой границей, которые потенциально могут уменьшить потери энергии во время прохождения пучка.

Список литературы

1. Кулипанов Г. Н., Изобретение В. Л. Гинзбургом ондуляторов и их роль в современных источниках синхротронного излучения и лазерах на свободных электронах. УФН 177 384–393 (2007).
2. Deacon D. A. G. et al. First operation of a free-electron laser //Physical Review Letters. – 1977. – Т. 38. – №. 16. – С. 892.
3. C. Pellegrini, A. Marinelli, and S. Reiche. The physics of x-ray free-electron lasers Rev. Mod. Phys. 88, 015006, 2016
4. Н. А. Винокуров, Е. Б. Левичев. Ондуляторы и вигглеры для генерации излучения и других применений. УФН 185, №. 9, 917–939 (2015).
5. Shevchenko O. A. et al. The Novosibirsk free-electron laser facility //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2019. – Т. 83. – №. 2. – С. 228-231.
6. S. Tantawi et al. Experimental Demonstration of a Tunable Microwave Undulator. Phys. Rev. Lett. 112, 164802, 2014
7. Шейнман Илья Львович. Ондуляторный эффект на изгибающей акустической волне. VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 3-6 июня 2019. Россия, Санкт-Петербург. <http://mwelectronics.ru/2019/Papers/137-140.pdf>
8. И. Л. Шейнман, О. С. Алексеева. Динамика короткого сгустка в кильватерном ондуляторе. Электроника и микроэлектроника СВЧ. X Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. Россия, Санкт-Петербург. 31 мая-4 июня 2021. Т. 1. 2021. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 612-616. ISBN 978-5-7629-2862-5.
9. I. L. Sheinman, O. S. Alekseeva. “Wakefield undulator based on a sinusoidal dielectric waveguide”. 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC’2021, JACoW Publishing. P. 274–276. 2021. Alushta, Russia. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB22>
10. I. Sheinman, "Waveguides with dielectric filling: accelerating and undulator wakefield structures", Proceedings of the International Conference “Days on Diffraction 2023”, St. Petersburg, Russia, 2023, pp. 205–211. doi: 10.1109/DD58728.2023.10325821.
11. Шейнман И. Л. Генерация ондуляторного излучения в волноводе с асимметричным периодическим диэлектрическим заполнением. Двадцать девятая международная конференция «Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC’2025»: Сборник тезисов международной конференции (Санкт-Петербург, 15-19 сентября 2025 г.). — СПб.: АО «НИИЭФА», 2025. – 262 с.
12. Левченко Б. Б. Поля релятивистского пучка заряженных частиц между параллельными плоскостями. Точные двумерные решения методом изображений //ТМФ. – 2020. – Т. 203. – №. 2. – С. 311-320.