

УДК 537.876.4

DOI: 10.17223/00213411/64/1/21

*К.В. ЖУКОВСКИЙ***АНАЛИТИЧЕСКИЙ УЧЕТ ВНЕОСЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В РЕНТГЕНОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ ГАРМОНИК ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ**

Дано аналитическое описание генерации гармоник ондуляторного излучения (ОИ) с учетом конечного размера пучка электронов, эмиттанса, отклонения пучка от оси и разброса энергии электронов, влияния постоянных магнитных компонент и гармоник поля. Полученные аналитические выражения для обобщенных функций Бесселя и Эйри описывают форму линий спектра и интенсивность ОИ в двухчастотном ондуляторе с учетом вышеуказанных факторов и позволяют различить вклады каждой компоненты магнитного поля, характеристик ондулятора и пучка в генерацию гармоник лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). Проанализировано влияние поля и его постоянных компонент с учетом конечного размера пучка и его отклонения от оси на спектр и интенсивность ОИ. Для моделирования ЛСЭ использована феноменологическая модель, с помощью которой исследована генерация гармоник излучения, включая четные гармоники, в экспериментах LCLS и LEUTL. Аналитически показано, что сильная вторая гармоника излучения на длине волны $\lambda = 0.75$ нм в эксперименте LCLS вызвана, в основном, отклонением траекторий электронов от оси на 15 мкм на длине усиления ЛСЭ, а в эксперименте LEUTL на длине волны $\lambda = 192$ нм она вызвана большим сечением самого пучка электронов. Результаты моделирования полностью согласуются с экспериментами. Развитый аналитический подход позволяет анализировать строящиеся и работающие ЛСЭ, их излучение, помогает уменьшить потери и скорректировать компоненты поля ондулятора, а также выявить физические причины излучения гармоник данной мощности в исследуемом ЛСЭ.

Ключевые слова: ондуляторное излучение, лазер на свободных электронах, внеосевые эффекты.

Введение

Идея об излучении зарядов в пространственно-периодическом магнитном поле и генерации ондуляторного излучения (ОИ) была предложена Гинзбургом [1]; ОИ было впервые получено Мотцом [2]. Развитие техники позволило реализовать предложенную Гинзбургом идею лазеров на свободных электронах (ЛСЭ); в этих устройствах когерентное излучение генерируется в ондуляторах электронами, сгруппированными в микробанчи, разделенные длиной волны излучения. В последнее время особый интерес представляет генерация когерентного излучения в рентгеновском диапазоне с длиной волны порядка нанометров и менее [3–9], где синхротронное излучение (СИ) долгое время было основным источником [10–13]. Когерентное рентгеновское излучение открывает новые возможности исследования быстрых процессов на наномасштабе. Для его генерации требуются электроны высоких энергий E с большим релятивистским фактором $\gamma = E/mc^2 \approx 10^3 - 10^4 \gg 1$, где m – масса электрона, c – скорость света, высокое качество электронных пучков с малым эмиттансом и разбросом энергий и высокое качество ондуляторов, где необходимо минимизировать отклонения поля от идеально периодического и отклонения пучка от оси. В реальных установках всегда присутствуют все вышеперечисленные факторы, которые могут нарушить группировку электронов. Кроме того, в ондуляторах присутствуют гармоники поля, которые влияют на спектр излучения [14–20]. В отличие от идеального спектра ОИ, в реальном спектре присутствуют четные гармоники, которые достигают $\sim 0.1\%$ мощности основного тона (см., например, [21–23]). Описание генерации и эволюции гармоник излучения в ЛСЭ представляет сложную и трудоемкую задачу. Обычно она решается с использованием специально разработанных численных программ; из последних исследований отметим [24–27], где с помощью различных программных кодов было смоделировано излучение целого ряда ЛСЭ. Из этих работ следует, что результаты численных моделей в целом хорошо, но часто приблизительно и с ощутимым разбросом описывают экспериментальные значения мощности гармоник ЛСЭ. Кроме того, практически отсутствует анализ причин того или иного поведения гармоник излучения. Феноменологическое моделирование излучения гармоник ЛСЭ [15–19] согласуется с численными моделями [28, 29], но не проясняет физическую причину генерации тех или иных гармоник.

В настоящей работе мы проведем аналитическое исследование поведения гармоник излучения ЛСЭ с реальными пучками и предложим ясное объяснение экспериментальных значений гармоник, включая четные, в нескольких реальных установках ЛСЭ с учетом их параметров.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>