

ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРАХ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С ИЗМЕНЯЕМЫМ ПАРАМЕТРОМ ДИПОЛЬНОСТИ ОНДУЛЯТОРОВ

К.В. Жуковский

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Теоретически исследуется рентгеновское излучение лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) с ондуляторами с изменяемым параметром дипольности ондуляторов k с выделенным группирователем электронов (банчером) и усилителем излучения гармоник. Анализируется эволюция мощности ЛСЭ по его длине в режиме усиления самозатравочного лазерного излучения гармоник HLSS и проводится сравнение с режимом самоусиления спонтанного излучения SASE. Используются точные аналитические выражения для коэффициентов Бесселя в реальных пучках и ондуляторах и аналитическое описание эволюции мощности в ЛСЭ. Рассматриваются новейшие ЛСЭ с изменяемым параметром дипольности k : FLASH 2, European XFEL, SACLA и SwissFEL. Проводится сравнительный анализ работы этих ЛСЭ в режимах SASE и HLSS. Результаты аналитического моделирования спектральных характеристик ЛСЭ хорошо согласуются с экспериментами. Выяснено, что в ЛСЭ с изменяемым параметром дипольности ондуляторов рост мощности в режиме HLSS происходит быстрее, чем в ЛСЭ SASE на той же длине волны. Результаты исследования сверены с экспериментом на установке FLASH2. Для ЛСЭ SACLA теоретически установлено, что имеющийся там пучок электронов с большим начальным разбросом энергий не позволяет применять каскадное усиление гармоник. Показано, что на ЛСЭ SwissFEL малые разброс энергий и эмиттанс пучка позволяют эффективно группировать электроны на длине волны второй гармоники в банчере; это позволяет достигнуть мощности насыщения в ЛСЭ HLSS на 10 м раньше, чем в ЛСЭ SASE; мощность и длина волны излучения при этом не меняются. По нашим расчетам, возможно эффективное усиление гармоник также на European XFEL.

Ключевые слова: ондуляторное излучение, лазер на свободных электронах, гармоники, рентгеновское излучение.

Введение

Ондуляторное излучение (ОИ) было предсказано в 1947 г. В.Л. Гинзбургом [1]. Его идеи были развиты и воплощены Мотцом (Motz), который построил первый ондулятор в 1953 г. [2]. М. Мадэй теоретически исследовал взаимодействие электронов с излучением в ондуляторе в [3]. На основе развитой им теории он построил первый лазер на свободных электронах (ЛСЭ) в 1977 г. [4]. Лазер излучал в миллиметровом диапазоне и подтвердил предсказание Гинзбурга о том, что возможно когерентное ондуляторное излучение от микросгустков (микробанчей) электронов, разделенных длиной волны излучения; при этом размер микробанча меньше длины волны. Развитие науки и техники в последнее время позволило ЛСЭ продвинуться в рентгеновский диапазон; современные ЛСЭ представляют собой гигантские установки размерами в километр и более, где пучки ультрарелятивистских электронов с энергией несколько ГэВ излучают сверхкороткие импульсы длительностью в пико- и фемто-секунды на длине волны нескольких нанометров и менее (см., например, [5–7]). Для этого требуется малый относительный разброс энергии электронов $\sim 10^{-4}$ и эмиттанс $\sim$ мм-мрад, ток до десятков кА и размер пучка ~ 10 –30 мкм; центровка пучков в ондуляторах должна осуществляться с точностью ~ 10 мкм, при этом суммарная длина ондуляторов может достигать 100 м, как, например, в рентгеновских ЛСЭ LCLS [8], European XFEL [9], PAL-XFEL [10] и др. В отсутствие готовых источников затравочного излучения в рентгеновском диапазоне в ЛСЭ обычно используются самоусиление спонтанного излучения (SASE) или самозатравочное излучение от первых ондуляторных секций SASE. Обычно в таких ЛСЭ используется основной тон, а высшие гармоники слабее его на 3–5 порядков (см., например, [11–14]). Чтобы получить излучение на максимальной частоте от электронов с возможно низкой энергией и уменьшить размеры и стоимость установки, можно использовать гармоники ОИ [15, 16]. При этом в ЛСЭ, где используется затравочное излучение или отфильтрованное монохроматором самозатравочное (self seeding) излучение SASE первых ондуляторных секций, получается более высокая спектральная плотность и лучшая временная когерентность излучения по сравнению с ЛСЭ SASE (см., например, [17–19]). В ЛСЭ SASE случайный характер начального шума электронного банча не позволяет получить хорошие временные характеристики когерентного излучения.

В [20, 21] была предложена концепция ЛСЭ с высоким усилением и генерацией гармоник (HGHG); в нем ондуляторные каскады следующих секций ЛСЭ используются для усиления и из-

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>