

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕНЕРАЦИИ ГАРМОНИК В ЛАЗЕРАХ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

К.В. Жуковский

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

Теоретически исследуется генерация гармоник, в особенности четных, в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ). Проводится сравнительный анализ полученных теоретических результатов и известных данных ЛСЭ SPARC и LEUTL. Моделируются спектральные характеристики ЛСЭ. Проводится также сравнительный анализ теоретических результатов разных авторов для мощности излучения гармоник ЛСЭ. Исследуется влияние на генерацию гармоник таких параметров, как конечные эмиттанс и сечение пучка и вызванные этим бетатронные колебания.

Ключевые слова: *ондуляторное излучение, лазер на свободных электронах, пучки релятивистских зарядов.*

Введение

В XXI в. излучение релятивистских электронов в пространственно-периодическом магнитном поле – ондуляторное излучение (ОИ) – продолжает активно использоваться и развиваться с учетом новых технических возможностей и новых горизонтов исследований. Впервые ОИ было получено Мотцом [1], следуя гипотезе Гинзбурга [2]. Когерентное ОИ от микробанчей электронов было получено Мадэем [3] в лазере на свободных электронах (ЛСЭ); Мадей также дал теоретическое описание излучению электронов при их взаимодействии с электромагнитной волной в ондуляторе. В настоящее время теория и применение ЛСЭ широко представлены в литературе [4–10]. ЛСЭ представляют источники излучения последнего четвертого поколения и являются логичным развитием источников синхротронного излучения (СИ) в последние полвека [11–14]. Когерентное излучение в ЛСЭ происходит от электронов, сгруппированных в банчи, разделенные длиной волны излучения. Электроны, двигаясь в ондуляторе со скоростью меньше скорости света, немного отстают от фотонов на каждом периоде ондулятора так, что сила Лоренца ускоряет электроны, которые находятся позади узлов электромагнитной волны, и замедляет электроны, которые опережают узлы волны в ондуляторе. Так, электроны группируются на длине волны излучения. Группировка на длинах волн гармоник происходит, но слабее, чем на длине волны основного тона. В ультрафиолетовом и более высокочастотных диапазонах отражающие элементы труднодоступны и применяются однопроходные ЛСЭ; в них взаимодействие электронов с излучением происходит за один проход в ондуляторе. Недостатком таких ЛСЭ являются большие размеры и стоимость. Получить более высокочастотное излучение, не меняя энергию пучка, можно, используя гармоники. Резонансы ОИ под эффективным углом Θ к оси приходятся на следующие длины волн:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{k_{\text{eff}}^2}{2} + (\gamma\Theta)^2 \right), \quad (1)$$

где n – номер гармоники излучения, $k_{\text{eff}}^2 = k^2 \varpi$, $k = H_0 \lambda_u e / 2\pi m c^2 \approx 0.9337 H_0 [T] \lambda_u [\text{см}]$ – ондуляторный параметр, e – заряд электрона, λ_u – период ондулятора, H_0 – амплитуда поля, dH_0 – амплитуда гармоники h поля, если она есть, например, в спиральном ондуляторе $d = h = 1$, и $\varpi = 1 + (d/h)^2$. Обычно период ондулятора $\lambda_u \sim 1\text{--}3$ см, энергия электронов в ЛСЭ в зависимости от частоты излучения ЛСЭ может достигать десятка ГэВ, а длина ускорителя может превышать 1 км, полная длина ондуляторов доходит до сотни метров. Современные пучки в ЛСЭ имеют большой релятивистский фактор $\gamma \sim 10^3\text{--}10^4$, малые разброс энергий $\sigma_e \sim 10^{-3}\text{--}10^{-4}$, эмиттанс $\epsilon_{x,y} \sim 1$ мм·мрад и сечение пучка $\sigma_{x,y} \sim 20\text{--}200$ мкм. В отличие от идеального спектра плоского ондулятора, на оси ЛСЭ, наряду с нечетными гармониками, излучаются и четные; их содержание может достигать $\sim 0.1\%$, а содержание третьей гармоники доходит до $\sim 1\text{--}2\%$ (см., например, [15–19]). Расчет эволюции гармоник ЛСЭ представляет сложную задачу, которая обычно решается

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>