УДК 621.384

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С ВНЕШНЕЙ ФОКУСИРОВКОЙ

В.В. СААКЯН

Центр передовых исследований с использованием синхротронного излучения при Ереванском государственном университете, Армения

(Поступила в редакцию 24 января 2011 г.)

Исследовано влияние фокусирующей системы на характеристики излучения для лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). Приведены результаты численного моделирования для проекта Европейского рентгеновского источника ЛСЭ. Рассмотрены варианты со стандартной периодической фокусировкой и с естественной ондуляторной фокусировкой. Предложена новая система центральной фокусировки с минимальным числом квадрупольных линз.

1. Введение

Самоиндуцируемые лазеры на свободных электронах (СЛСЭ) на основе излучения являются самоусиления спонтанного одним ИЗ наиболее перспективных источников для генерации когерентного излучения в рентгеновском диапазоне длин волн [1,2]. В СЛСЭ спонтанное излучение, генерируемое выскоэнергетичными электронами в периодической магнитной структуре – ондуляторе, взаимодействуя с электронами пучка, приводит к модуляции плотности продольного распределения электронов на частоте основной гармоники ондуляторного излучения по мере движения пучка в магнитной системе. Модуляция плотности электронного пучка в свою очередь стимулирует экспоненциальный рост когерентного излучения вдоль ондулятора и микробанчировку электронного пучка до полного насыщения излучения. Одним из основных условий для стимулирования процесса микробанчировки согласование электронного пучка является пространственно-угловых характеристик электронного и фотонного пучков для обеспечения эффективного взаимодействия излучения с электронами пучка.

Длина насыщения излучения L_s в СЛСЭ сильно зависит от характерной длины волны излучения λ_r ($\lambda_r \approx \lambda_u (1 + K^2/2)/2\gamma^2$, где λ_u – период ондулятора; *K* – параметр ондулятора: $K = 0.934\lambda_u [\text{см}] B[\text{Тл}]$; *B* – магнитное поле ондулятора; γ – Лоренц-фактор электронов) и для рентгеновских длин волн может достигать нескольких сот метров. Для обеспечения эффективной генерации в рентгеновских СЛСЭ обычно используется внешняя ФОДО фокусировка электронного пучка [3]. ФОДО фокусировка представляет собой секторные фокусирующие (Ф) и дефокусирующие (Д) магниты с прямолинейными промежутками (O). Поперечные среднеквадратичные размер и расходимость электронного пучка при этом задаются расстоянием между квадрупольными линзами и набегом фазы бетатронных колебаний на ФОДО ячейку периодичности, которые в конечном итоге определяют параметры излучения – длину насыщения, яркость и мощность. При этом обеспечение нормального процесса СЛСЭ обусловлено жесткими допусками на точность установления линз для предотвращения возмущения траектории электронного пучка.

В настоящей статье представлены результаты исследований параметров излучения (длина насыщения, мощность излучения) для рентгеновского СЛСЭ в зависимости от структуры внешней фокусировки. Предложена новая система центральной фокусировки, которая позволяет оптимально согласовать пространственно-угловые характеристики электронного и фотонного пучков с минимальным числом квадрупольных линз. Исследован также процесс СЛСЭ с естественной фокусировкой, обеспечиваемой ондуляторными секциями. Численные расчеты проведены на примере Европейского проекта рентгеновского ЛСЭ [4].

В Европейском проекте ЛСЭ электронный пучок с нормализованным эмиттансом в 1.4 мм-мрад в линейном ускорителе доводится до максимальной энергии 17.5 ГэВ. На выходе из ускорителя располагаются ондуляторные секции, где генерируется СЛСЭ на различных длинах волн. В частности, каналы SASE1 и SASE2 предназначены для генерации когерентного излучения на длине волны 0.1 нм. Канал SASE1 предполагается использовать для генерации излучения на фиксированной длине волны, в то время как SASE2 может быть настроен в диапазоне длин волн от 0.1 до 0.4 нм. Третий канал SASE3 предназаначен для генерации излучения в диапазоне длин волн от 0.4 нм до 1.6 нм. Для численного моделирования процесса СЛСЭ был использован трехмерный код SIMPLEX [5].

2. СЛСЭ со стандартной ФОДО фокусировкой

Для периодической ФОДО фокусирующей системы среднеквадричные поперечный размер σ_x и угловой разброс σ_x , электронного пучка определяются выражениями

$$\overline{\sigma_x^2} = \varepsilon L [1/\sin \mu - (1/6) \operatorname{tg}(\mu/2)],$$

$$\overline{\sigma_{x'}^2} = \varepsilon (4/L) \operatorname{tg}(\mu/2),$$
(1)

где ε – эмиттанс пучка; μ – набег фазы за период и L – длина периода. Поскольку процесс СЛСЭ обусловлен эффективным взаимодействием электронного и фотонного пучков на фазовой плоскости, длина насыщения, яркость и мощность излучения зависят от параметров фокусирующей системы μ и L. В проекте Европейского СЛСЭ фокусирующая система в ондуляторной секции представляет собой стандартную периодическую ФОДО структуру длиной 12.2 м. В зависимости от канала излучения набег фазы бетатронных колебаний за период варьирует в пределах 15–50 градусов. В табл.1 приведены параметры ондуляторных секций SASE1 и SASE2 для электронного пучка с энергией 17.5 ГэВ и нормализованным эмиттансом 1.4 мм-мрад.

	SASE1	SASE2
Длина волны излучения, нм	0.1	0.1–0.4
Параметр ондулятора К	3.3	2.8-6.1
Общая длина, м	201.3	256.2
Число ФОДО периодов	17	21
Набег фазы, град	32	46/15

Табл.1. Параметры ондуляторов SASE1 и SASE2.



Рис.1. Изменение бета-функций вдоль ондуляторной секции SASE1.



Рис.2. Кривая роста мощности излучения СЛСЭ вдоль ондуляторной секции SASE1.

На рис.1 представлены изменения горизонтальной и вертикальной бетатронных функций вдоль ондуляторной линии SASE1, где число ФОДО

периодов составляет 17. Результаты численного моделирования роста мощности излучения вдоль ондуляторной линии SASE1 представлены на рис.2.

Как следует из рис.2, для ондуляторной секции SASE1 насыщение мощности излучения достигается вблизи 200 м и мощность излучения достигает порядка 23 ГВт на длине волны 0.1 нм. В табл.2 приведены результаты численного моделирования СЛСЭ для каналов SASE1 и SASE2, работающих на длине волны 0.1 нм, в предположении стандартной внешней ФОДО фокусировки электронного пучка. В табл.2 L_s есть длина насыщения и P_s есть мощность излучения.

Табл.2. Параметры излучения в каналах SASE1 и SASE2 со стандартной фокусировкой.

	<i>Р</i> , ГВт	<i>Ls</i> , м
SASE1	23	198
SASE2	24	250

3. Параметры излучения без внешней фокусировки

Известно, что для СЛСЭ, работающего в области рентгеновских длин волн, внешняя фокусировка необходима для оптимального согласования параметров электронного и фотонного пучков. Однако изучение возможности работы СЛСЭ без внешней фокусировки в ондуляторной секции представляет собой особый интерес, поскольку позволяет избежать возмущения траектории электронного пучка из-за конечных допусков на смещение квадрупольных линз от оси ондулятора. Как показывают исследования [6], возмущение траектории электронного пучка приводит к существенной расстройке процесса СЛСЭ и, как следствие, к резкому падению мощности излучения на выходе из ондулятора, особенно в рентгеновском диапазоне длин волн. Результаты численных расчетов показывают, что для среднеквадратичных смещений квадрупольных линз порядка 10 мкм, мощность излучения уменьшается приблизительно на 50% [6].

Для исследования процесса СЛСЭ без внешней фокусировки необходимо согласовать начальные пространственно-угловые характеристики электронного пучка с аксептансом ондуляторной секции. Нами рассмотрен случай периодического решения для бетатронной функции, которая позволяет иметь минимум горизонтального размера в середине ондуляторной секции. На рис.3 приведены горизонтальная и вертикальная бетатронные функции вдоль одуляторной секции SASE2, которые определяют огибающую пучка вдоль канала.

Для рассмотренного варианта проведено численное исследование процесса СЛСЭ. Результаты численного моделирования показывают, что процесс самоусиления спонтанного излучения и генерации ЛСЭ имеет место и при естественной ондуляторной фокусировке, хотя процесс микробанчировки электронного пучка замедляется. В табл.3 приведены результаты численного моделирования для каналов SASE1 и SASE2, работающих на длине волны 0.1 нм. Как видно из полученных результатов, длина насыщения излучения практически не меняется, в то время как максимальная мощность излучения уменьшается примерно на 40–50%.



Рис.3. Изменения горизонтальной и вертикальной бета-функций вдоль SASE2.

Табл.3. Параметры излучения в каналах SASE1 и SASE2 без внешней фокусировки.

	P_s/P_0	L_s/L_0
SASE1	0.61	0.98
SASE2	0.52	1.01

4. Центральная фокусировка

Рассмотрим альтернативный вариант фокусирующей системы С сосредоточенной фокусировкой в центре ондуляторной секции – вариант "центральной фокусировки" с минимальным числом квадрупольных линз. В этом случае все квадруполи выключены, кроме двух ФОДО ячеек в центре ондуляторной секции. В рассматриваемом случае длина ФОДО ячейки составляет 12.2 м. На рис.4 представлены периодические решения для горизонтальной и вертикальной бета-функций вдоль ондуляторной секции SASE1 в случае центральной фокусировки. Параметры электронного пучка на входе в ондулятор при этом задаются предварительным формированием пучка в согласующей секции. Оптимальная генерация СЛСЭ достигается за счет вариации сил квадрупольных линз, расположенных в середине ондуляторной секции. В частности, для канала SASE1 оптимальная величина среднего значения бетатронной функции составила приблизительно 57 м.

На рис.5 представлены кривые роста мощности излучения в канале SASE1 для случая стандартной ФОДО фокусировки и варианта с центральной фокусировкой. Как следует из рис.5, мощность излучения при центральной

фокусировке практически достигает максимума, а длина насыщения уменьшается приблизительно на 5%.



Рис.4. Изменения горизонтальной и вертикальной бета-функций вдоль SASE1.



Рис.5. Кривые роста мощности излучения в канале SASE1 для случая со стандартной ФОДО структурой и центральной фокусировкой.

Табл.4. Параметры излучения в каналах SASE1 и SASE2 с центральной фокусировкой (длина волны излучения 0.1 нм).

	P_s/P_0	L_s/L_0
SASE1	0.96	0.96
SASE2	0.80	0.87

Результаты численного моделирования для мощности излучения и длины насыщения в каналах SASE1 и SASE2 с центральной фокусировкой приведены в табл.4.

5. Заключение

В работе представлены результаты исследования процесса СЛСЭ при различной внешней фокусировке электронного пучка. Рассмотрены варианты со стандартной периодической ФОДО фокусировкой, с естественной ондуляторной фокусировкой и с центральной фокусировкой. На примере Европейского проекта рентгеновского СЛСЭ показано, что при естественной фокусировке электронного пучка в ондуляторах процесс самоусиления спонтанного излучения и микробанчировки имеет место, хотя мощность излучения при насыщении падает приблизительно в два раза по сравнению со стандратной ФОДО внешней фокусировкой. При центральной фокусировке электронного пучка в ондуляторе мощность излучения при насыщении достигает максимального значения при одновременном уменьшении длины насыщения.

Автор выражает благодарность В. Декингу, А. Тарлояну, В. Хачатряну и В. Цаканову за полезные обсуждения и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **E.Saldin, E.Schneidmiller, M.Yurkov.** The Physics of Free Electron Lasers. Berlin, Springer, 2000.
- 2. W.Barletta et al. Nucl. Instrum. Meth. A, 618, 69 (2010).
- 3. Z.Huang, K.-J.Kim. Phys. Rev. ST Accel. Beams, 10, 034801 (2007).
- 4. The European X-Ray Free-Electron Laser. Technical design report, DESY-06-097, Hamburg, July 2006.
- 5. **T.Tanaka.** FEL Simulation Code for Undulator Performance Estimation, Proc. of 26th FEL Conf., Trieste, Italy, 2004, pp.435-438.
- 6. **V.Khachatryan et al.** Effect of Jitter and Quadrupole Alignment Errors on SASE FEL Performance. Proc. of European Particle Accel. Conf., Genoa, Italy, 2008, pp.94-96.

ԱՐՏԱՔԻՆ ՖՈԿՈՒՍԱՅՈՒՄՈՎ ԱԶԱՏ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ԼԱԶԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Վ.Վ. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

Հետազոտված է ֆոկուսացման եղանակի ազդեցությունը Ճառագայթման հատկություն-ների վրա ազատ էլեկտրոնային լազերների (ԱԷԼ) համար։ Ներկայացված են Եվրոպական ռենտգենյան ԱԷԼ նախագծի համար կատարված թվային հաշվարկների արդյունքները։ Դի-տարկված են ստանդարտ պարբերական ֆոկուսացումով եղանակը և բնական օնդուլատո-րային ֆոկուսացումը։ Առաջարկված է նոր կենտրոնական ֆոկուսացման եղանակ քիչ ֆո-կուսացնող էլեմենտների կիրառմամբ։

STUDY OF FREE ELECTRON LASER PERFORMANCE WITH EXTERNAL FOCUSING

V.V. SAHAKYAN

The radiation characteristics dependence on the focusing system for free-electron lasers (FEL) is considered. The results of numerical simulations for European XFEL project are discussed. The option of the standard periodic focusing and the natural undulator focusing methods are investigated. A new system of central focusing with a minimal number of quadrupole lenses is proposed.