

УДК 621.384.6

Формирование и диагностика ультракоротких электронных банчей в лазерах на свободных электронах

О. И. Бровко, Р. С. Макаров, Е. А. Матюшевский, Н. А. Морозов, Е. М. Сыресин, М. В. Юрков

Обсуждены формирование и диагностика ультракоротких электронных банчей для лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), таких как FLASH, рентгеновский лазер XFEL и ЛСЭ для экстремальной ультрафиолетовой (УФ) литографии. Во всех ускорительных комплексах требуются формирование и диагностика ультракоротких электронных банчей с длиной около 50 мкм. Инфракрасный (ИК) ондулятор, изготовленный в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) и установленный на FLASH, применяется для измерения продольной длины электронных сгустков. Совместно с УФ-ондулятором он также используется для двухцветной генерации излучения в ЛСЭ, что позволяет исследовать динамику атомных и молекулярных систем с временным разрешением 100—500 фс. Для измерения излучения ЛСЭ FLASH в широком диапазоне длин волн (6,5—30 нм) с большим динамическим диапазоном разработана диагностика на основе микроканальных пластин.

PACS: 41.75.-i

Ключевые слова: лазер на свободных электронах, электронный банч, ондулятор, волна, диагностика.

Введение

Для генерации мощного синхротронного излучения (СИ) в УФ- и рентгеновской областях ши-

роко используются специализированные электронные синхротроны. Одна из ключевых характеристик источника синхротронного излучения — его яркость

$$B = \frac{d\dot{N}}{d\lambda} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\varepsilon_x \varepsilon_y},$$

где \dot{N} — поток фотонов СИ;
 ε_x и ε_y — горизонтальные и вертикальные эмитансы электронного пучка, соответственно;
 $\Delta\lambda$ — ширина полосы, равная 0,1 % от длины волны λ .

Бровко Олег Игоревич, начальник отдела.

Макаров Роман Станиславович, и. о. младшего научного сотрудника.

Матюшевский Евгений Александрович, главный технический специалист.

Морозов Николай Анатольевич, начальник сектора.

Сыресин Евгений Михайлович, помощник директора лаборатории.

Юрков Михаил Владимирович, ведущий научный сотрудник. Объединенный институт ядерных исследований.

Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Ж. Кюри, 6.

E-mail: obrovko@list.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2009 г.

Яркость источников СИ обычно ограничена горизонтальным эмиттансом электронного пучка, $\varepsilon_x \gg \varepsilon_y$, и шириной спектра СИ, для которого $\Delta\lambda \cong \lambda$.

Яркость излучения ЛСЭ на семь—восемь порядков превышает яркость синхротронного излучения в новых современных источниках СИ третьего поколения [1, 2]. В дифракционном пределе яркость излучения в ЛСЭ достигает уровня

$$B \cong 16 \frac{d\dot{N}}{d\lambda} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$$

за счет снижения эмиттансов пучка и ширины полосы до величин $\varepsilon_x \cong \varepsilon_y \cong \lambda/4$ и $\Delta\lambda/\lambda \cong 1\%$.

Поток фотонов в ЛСЭ \dot{N} существенно зависит от соотношения между длинами волны излучения λ и электронного банча l_b . При длине волны излучения, много меньшей длины сгустка $\lambda \ll l_b$, электроны излучают некогерентно, а их суммарная интенсивность излучения пропорциональна числу электронов в сгустке N_e , $\dot{N} \propto N_e$. В обратном случае, когда $\lambda \gg l_b$, происходит генерация когерентного излучения, и интенсивность излучения пропорциональна квадрату числа электронов в банче $\dot{N} \propto N_e^2$.

Таким образом, формирование в ЛСЭ ультракоротких электронных банчей с продольной длиной, сравнимой с длиной волны излучения, позволяет на несколько порядков поднять яркость когерентного излучения за счет увеличения потока фотонов из источника.

Еще одно преимущество ЛСЭ по сравнению с лазерными источниками когерентного излучения — перестройка длины волны излучения при изменении энергии электронов.

Формирование ультракоротких банчей в ЛСЭ

Электронный пучок в ЛСЭ FLASH [1, 2] формируется в электронной пушке с фотокатодом, облучаемым лазерным излучением. При облучении фотокатода лазерным импульсом электронный пучок с током 50 А ускоряется в инжекционной секции до энергии 5 МэВ. Суммарный заряд электронов банча составляет 1 нК, а длительность импульса тока — 4,5 пс. Нормализованный эмиттанс пучка равен 1,5 п·мм·мрад. Для ускорения пучка в ЛСЭ FLASH используются сверхпроводящие секции, работающие при частоте 1,3 ГГц. В первой ускорительной секции FLASH электронный пучок ускоряется до энергии 127 МэВ. После ускорения электроны проходят через специальную ускорительную секцию, работающую на частоте 3,9 ГГц, где создается линейный разброс их энергии (чирп), а затем через банч-компрессор — дисперсионную секцию, где происходит продольная линейная компрессия электронного пучка до уровня тока 200—300 А и длительности импульса около 1 пс.

Из-за эффектов нелинейной зависимости продольной фазы электронов от частоты продольный профиль электронного банча FLASH перестает быть гауссовым при компрессии пучка. На переднем фронте банча возникает микроструктура с существенным увеличением локального тока (рис. 1), которая и обеспечивает генерацию когерентного излучения.

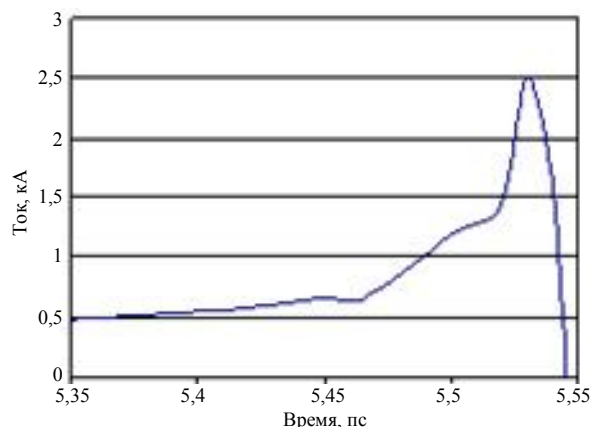


Рис. 1. Микроструктура профиля электронного банча FLASH с локальной концентрацией тока на переднем фронте

На следующей стадии электронный пучок ускоряется до энергии 370 МэВ. После прохождения следующего банч-компрессора амплитуда импульсного тока пучка достигает уровня 1,5—3 кА, его среднеквадратичная длительность (СКД) составляет 150 фс, а СКД микроструктуры банча — около 30 фс.

После второго банч-компрессора электронный пучок ускоряется до максимальной энергии 1 ГэВ. Ускоренный электронный пучок проходит через секцию длиной 27 м, состоящую из шести ондуляторов. Ондулятор FLASH имеет следующие параметры: период ондулятора — 2,73 см, магнитное поле — 0,48 Тс, вертикальный зазор — 12 мм.

Генерация излучения в ЛСЭ определяется параметрами микроструктуры на переднем фронте банча, ее локальным током и эмиттансом пучка, а продольный размер микроструктуры банча — относительным энергетическим разбросом и величиной матричного элемента банч-компрессора R_{56} . При оптимизации параметров банч-компрессора удастся сформировать электронный пучок с малым эмиттансом и высоким локальным током в микроструктуре переднего фронта банча.

Генерация когерентного излучения в ЛСЭ

Генерация ондуляторного излучения приводит к модуляции плотности электронов банча. На входе в ондулятор в электронном пучке присутствует некоторый начальный уровень дробового шума.

По мере распространения пучка электронов в ондуляторе глубина модуляции его плотности возрастает и, соответственно, увеличивается интенсивность генерации излучения.

Механизм генерации интенсивного излучения в режиме с самоусилением волны спонтанного излучения (SASE — Self Amplification Spontaneous Emission) впервые был предложен новосибирскими учеными Я. С. Дербеневым, А. М. Кандратенко и Е. Л. Салдиным [3]. На входе в ондулятор длина банча намного превосходит длину волны излучения и интенсивность излучения пропорциональна числу электронов в банче $I_{rad} \propto N_e$. При нелинейном продольном сжатии электронного пучка в банч-компрессоре на переднем фронте банча возникает микроструктура со среднеквадратичной длиной около 10 мкм и локальной концентрацией импульсного тока 2—3 кА (см. рис. 1). При этом среднеквадратичная длина банча значительно выше и равна 50 мкм.

Самомодуляция плотности электронов в микроструктуре на переднем фронте банча существенно усиливается за счет излучения по мере распространения пучка электронов в ондуляторе. В результате характерный продольный масштаб, на котором происходит вариация плотности электронов в микроструктуре, становится сравним с длиной волны излучения. В этом случае происходит фазовый переход от генерации некогерентного излучения к генерации когерентного излучения, когда интенсивность излучения становится пропорциональной квадрату числа коррелированных электронов в микроструктуре N_k , $I_{rad} \propto N_k^2$. В результате формирование когерентного излучения ЛСЭ определяется локальным током микроструктуры, ее продольным размером и эмиттансом пучка. Все основные характеристики излучения определяются параметром ЛСЭ ρ [2], который играет роль параметра подобия в гидродинамике,

$$\rho = \left[\frac{I}{I_A} \cdot \frac{A^2 K^2 d^2}{32 \pi^2 \gamma^2 \sigma_{\perp}^2} \right]^{1/3},$$

где $I = 2—3$ кА — пиковый ток в микроструктуре банча FLASH;

$K = 1,2$ — параметр ондуляторности;

$d = 2,73$ см — период ультрафиолетового ондулятора FLASH;

$\gamma = 1,37 \cdot 10^4$ — релятивистский фактор;

$A = J_0(Q) - J_1(Q)$, J_0 и J_1 — функции Бесселя,
 $Q = K^2 / (2(K^2 + 1)) = 0,3$.

По мере транспортировки пучка в ондуляторе энергия, излученная за импульс, экспоненциально растет $\varepsilon_w = \varepsilon_{w0} \cdot \exp(z / L_s)$, увеличиваясь на три—четыре порядка до тех пор, пока не достигнет некото-

рого уровня насыщения. Здесь $L_s \sim d / 4\pi\rho \cong 2,5$ м — длина в ондуляторе, на которой электрическое поле излучения возрастает в e -раз.

Насыщение энергии волны наступает, когда эффективность генерации излучения достигнет уровня $\varepsilon_w / \gamma N_k m c^2 \sim \rho \cong 3 \cdot 10^{-3}$, N_k — число коррелированных электронов в микроструктуре, излучающих в одной фазе, $N_k = I \cdot \tau / 2e \cong 2 \cdot 10^7$. Длительность импульса когерентного излучения равна $\tau_c \sim (\lambda/c) \cdot (L_s/d) \cong 4$ фс, а ширина спектра излучения в ЛСЭ — $\Delta\lambda/\lambda \sim 2\rho \cong 6 \cdot 10^{-3}$.

Усиление мощности излучения в ЛСЭ от уровня дробового шума до режима насыщения для коррелированных электронов оценивается отношением $G = (N_k/3) \cdot (\pi \ln N_k)^{1/2} \cong 10^7$. Отношение интенсивностей излучения в режиме насыщения и режиме спонтанного излучения характеризуется фактором $G^2/N_e \cong 10^4$.

Средняя энергия, излученная за импульс на ЛСЭ FLASH, составляет около 40 мкДж, импульсная мощность излучения оценивается в 10 ГВт при длительности импульса излучения ~ 10 фс и средней мощности ~ 20 мВт [2]. Когерентное излучение в ЛСЭ полностью соответствует основным параметрам лазерного излучения. Угловая расходимость когерентного излучения определяется дифракционным пределом $\theta \approx \sqrt{\lambda / \pi L} \cong 15$ мкрад ($L = 27$ м — полная длина ондуляторных секций). Размер пятна когерентного излучения на выходе из ондулятора равен $r \approx \sqrt{\lambda L / \pi} \cong 0,3$ мм. Экспериментально достигнутая пиковая яркость на длине волны $\lambda = 13,7$ нм составляет $B = (6 \pm 3) \times 10^{29}$ ф/(с·мм²·мрад²) в пределе 0,1 % ширины полосы [2].

Диагностика ультракоротких банчей на основе ондуляторного излучения

Измерение продольного профиля электронного банча в ЛСЭ основано на измерении ондуляторного излучения на длинах волн, сравнимых с длиной электронного банча. Энергия, излученная электронным банчем за импульс, зависит от числа электронов в нем N_e и отношения длины волны излучения λ к среднеквадратичной длине банча σ_e

$$\Delta E_{und}(\lambda) \propto \begin{cases} N_e, & \sigma_e / \lambda \gg 1, \\ N_e^2 |F(\sigma_e / \lambda)|^2, & \sigma_e / \lambda \approx 1, \\ N_e^2, & \sigma_e / \lambda \ll 1. \end{cases}$$

Для продольного профиля банча с гауссовым распределением электронов форм-фактор равен

$$|F|^2 = \exp(-2\pi\sigma_e / \lambda)^2.$$

Итак, измеряя энергию, излученную электронным банчем за импульс, в зависимости от длины волны излучения в области $\lambda \cong 1\text{—}200$ мкм, можно определить форм-фактор и, соответственно, измерить среднеквадратичную длину банча.

Для измерения форм-фактора и продольного профиля банча на ЛСЭ FLASH разработан специализированный ондулятор, производящий излучение в диапазоне 1—200 мкм [4—7]. Величина вертикального магнитного поля в зависимости от тока в обмотках ондулятора показана на рис. 2.

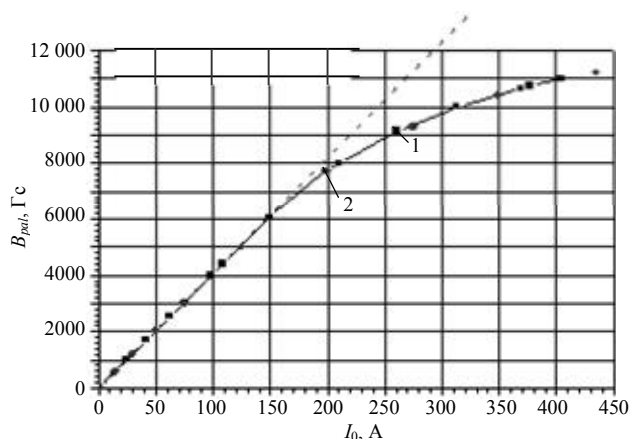


Рис. 2. Зависимость магнитного поля в ИК-ондуляторе от тока в его обмотках:

1 — эксперимент; 2 — моделирование TOSCA

Магнитное поле в ондуляторе варьируется в пределах 0,1—1,1 Тл. Величины первого I_1 и второго I_2 интегралов магнитного поля будут

$$I_1 = \int Bdz; \quad I_2 = \int dz' \int Bdz$$

при различных значениях тока в обмотках ондулятора (рис. 3). Типичные значения первого интеграла составляют $I_1 \cong 10^{-4}$ Тл·м², а второго — менее $I_2 \cong 5 \cdot 10^{-3}$ Тл·м² [3]. Параметры экспериментов на FLASH с ИК-ондулятором ОИЯИ приведены ниже [4—6].

Электронный пучок

Энергия электронов, ГэВ..... 0,5—1

Заряд электронов банча, нК..... 1

Среднеквадратичная длина, мкм:

банча..... 50

излучающей микроструктуры банча..... 10—15

Нормализованный эмиттанс, π мм·мрад 1—1,5

Ондулятор

Магнитное поле, Тл..... 0,1—1,1

Период, см..... 40

Число периодов..... 9

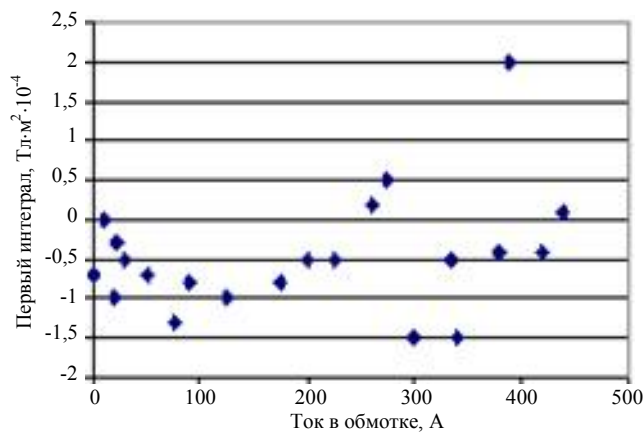
Излучение

Длина волны, мкм..... 1—200

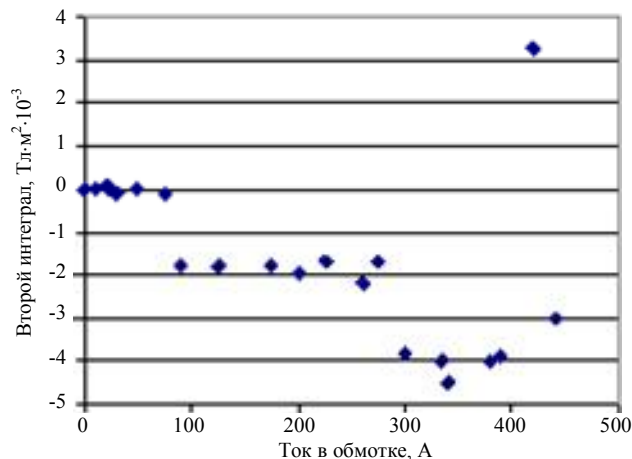
Пиковая мощность, МВт..... 4

Энергия, излученная в импульсе, мкДж 4

Длительность импульса, пс..... 0,5—6



а



б

Рис. 3. Зависимости первого (а) и второго (б) интегралов магнитного поля от тока в обмотках ондулятора

ИК-ондулятор установлен на FLASH после УФ-ондулятора, работающего на первой гармонике с перестраиваемой длиной волны ($\lambda > 6,5$ нм) в зависимости от энергии электронов. ИК-ондулятор обычно работает в фоновом режиме при неизменной энергии электронов. Вариация длины волны ондуляторного излучения в нем происходит за счет изменения магнитного поля, приводящего к изменению параметра ондуляторности K

$$\lambda = \frac{d}{2\gamma^2} \cdot (1 + K^2 / 2),$$

где $d = 40$ см — период ИК-ондулятора;

γ — релятивистский фактор;

$K = \gamma\alpha = eBd/2\pi mc$ — параметр ондуляторности для гармонического магнитного поля;

α — амплитуда горизонтального угла электронов в ондуляторе.

В ходе измерений спектра ондуляторного излучения была обнаружена разница между измеренной длиной волны и расчетным значением λ на уровне $(8 \pm 1) \%$ [7]. Оказалось, что эта разница обусловлена наличием высоких гармоник магнит-

ного поля в ондуляторе (рис. 4). На рис. 4 — B — амплитуда вертикального магнитного поля в ондуляторе. Для произвольного магнитного поля амплитуда горизонтального угла электронов в ондуляторе определяется первым интегралом магнитного поля на четверти периода этого ондулятора

$$\alpha = \frac{e}{\gamma mc} \int_0^{d/4} B dz.$$

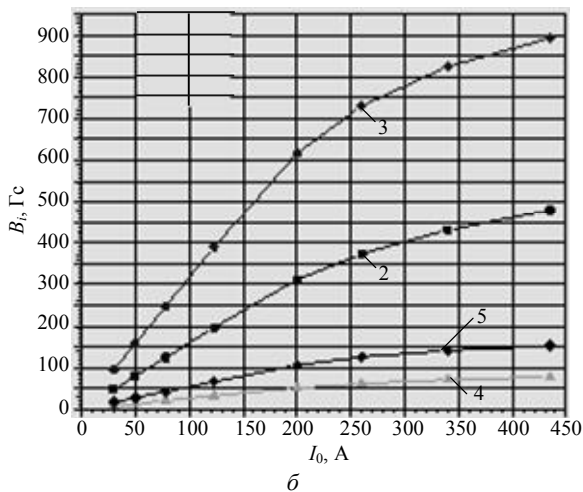
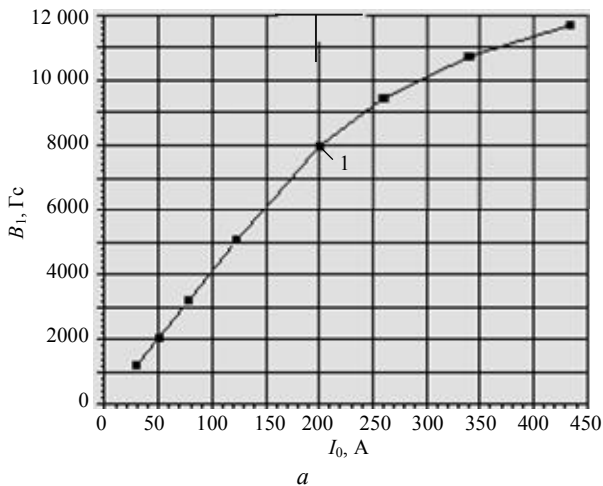


Рис. 4. Первая (а) и другие высшие гармоники (б) вертикального магнитного поля ИК-ондулятора: 1 — B_1 ; 2 — B_3 ; 3 — B_5 ; 4 — B_7 ; 5 — B_9

В присутствии высоких гармоник магнитного поля параметр ондуляторности равен

$$K = \alpha \gamma = 93,4 d_{(m)} \cdot (B_1 + B_3/3 - B_5/5 - B_7/7 + B_9/9 + B_{11}/11 - B_{13}/13 - B_{15}/15)_{(T)}.$$

Спектры ИК-излучения для разных параметров ондуляторности приведены на рис. 5, а [7]. Спектр излучения измерен с помощью ИК-камеры, работающей в диапазоне 1—1000 мкм. Длительность импульса ИК-излучения из ондулятора равна $T = N_{und} \lambda / c$, где $N_{und} = 9$ — число периодов ондулятора.

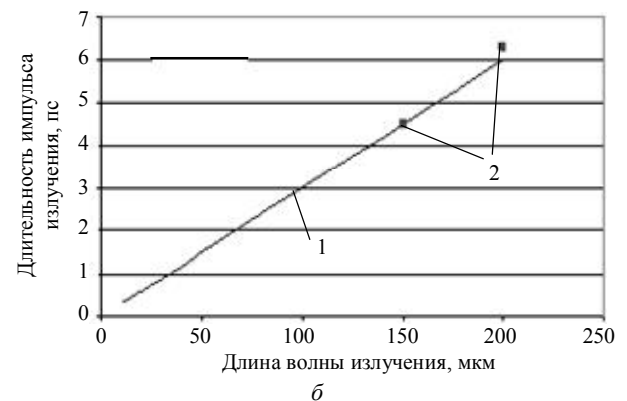
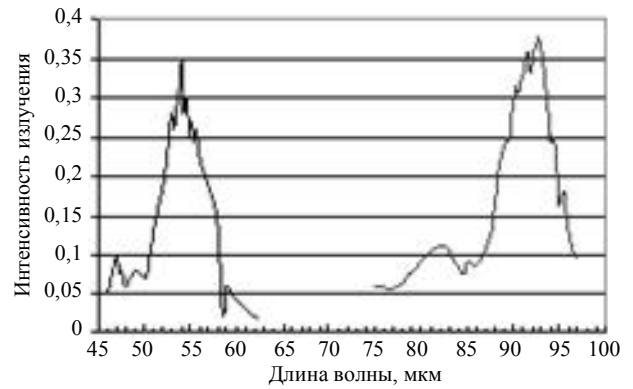


Рис. 5. Излучение ондулятора: а — спектры ИК-излучения для различных значений параметра ондуляторности; б — длительность импульса ИК-излучения для разных длин волн: 1 — моделирование; 2 — эксперимент

В зависимости от длины волны длительность импульса излучения варьируется от 6 до 0,3 пс (см. рис. 5, б). Расчетная длительность импульса хорошо согласуется с экспериментальными результатами измерения с помощью электрооптической техники (см. рис. 5, б). Ширина спектра в зависимости от длины волны приведена на рис. 6. При длинах волн 100—200 мкм она близка к расчетному значению $\Delta\lambda/\lambda = 0,9/N_{und}$. При уменьшении длины волны относительная ширина спектра возрастает [7], что связано, по-видимому, с небольшой неперпериодичностью движения электронов в ондуляторе из-за неполной компенсации первого и второго интегралов магнитного поля. Так, учет горизонтального смещения пучка в ондуляторе приводит к изменению относительной ширины спектра излучения

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{0,9}{N_{und} - 2x\gamma / dK},$$

где $x = eI_2/\gamma mc^2$ — горизонтальное смещение пучка в ондуляторе из-за неполной компенсации второго интеграла магнитного поля I_2 .

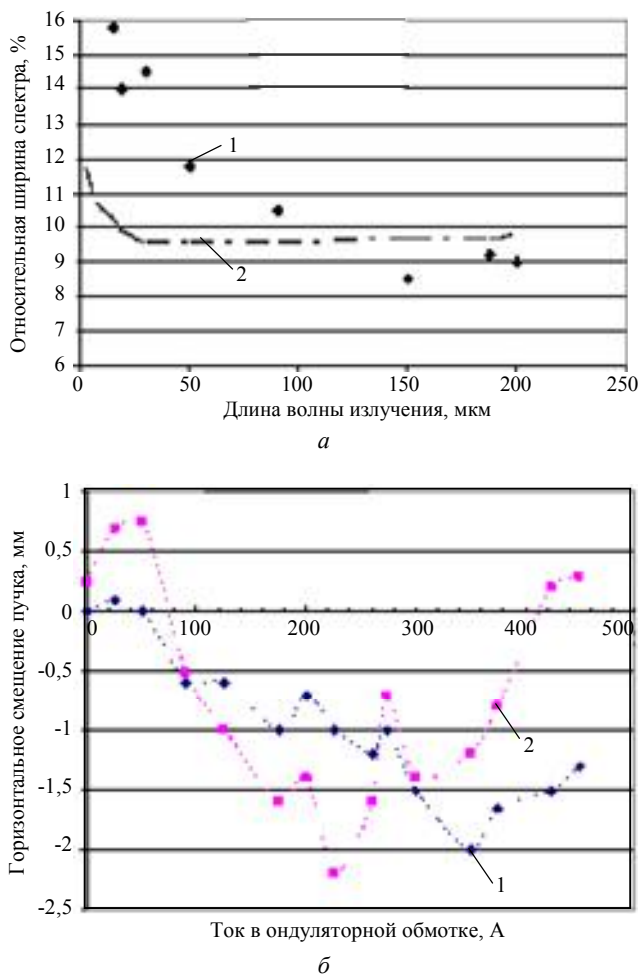


Рис. 6. Движение электронов в ондуляторе:

a — зависимость относительной ширины спектра излучения от длины волны:
 1 — эксперимент; 2 — моделирование;
б — горизонтальное смещение пучка в ондуляторе в зависимости от тока в его обмотках:
 1 — измерение на основе второго интеграла; 2 — ВРМ-измерение

Горизонтальное смещение пучка в ондуляторе, измеренное с помощью датчика положения пучка (ВРМ) и полученное на основе измерений второго интеграла, приведено на рис. 6, б.

Учет горизонтального смещения пучка в ондуляторе приводит к росту относительной ширины спектра при малых длинах волн, однако расчетное значение уширения спектра ниже, чем наблюдается в эксперименте.

Измерение продольного профиля банча с помощью ИК-ондулятора

Зависимость энергии, излученной за импульс, от длины волны излучения приведена на рис. 7. Максимальная величина энергии, излученной за импульс, в эксперименте составляет 4 мкДж для электронного банча с зарядом 0,5 нК при энергии электронов 700 МэВ [7]. Генерация ИК-излучения обусловлена микроструктурой переднего фронта

банча, где происходит резкое возрастание импульсного тока (см. рис. 2). Отметим, что среднеквадратичная длина электронного банча на FLASH составляет около 50 мкм, в то время как длина микроструктуры переднего фронта банча, обеспечивающая генерацию когерентного излучения, — около 10 мкм, что сравнимо с длиной волны ИК-излучения.

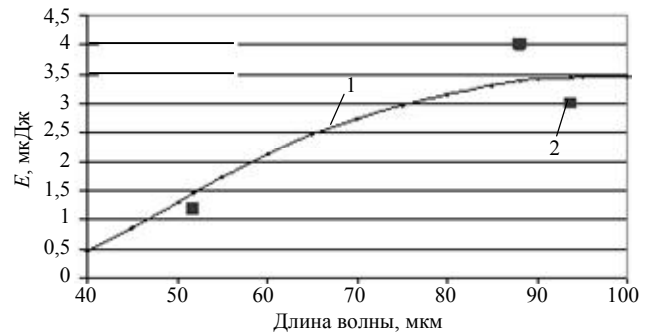


Рис. 7. Зависимость энергии, излученной за импульс, от длины волны:

1 — моделирование; 2 — эксперимент

Энергия, излученная за микроимпульс, для электронов микроструктуры с гауссовым распределением равна

$$\Delta E_{und} = \Delta \epsilon_e N_m^2 \exp(-2\pi\sigma_m / \lambda)^2,$$

где $\Delta \epsilon$ — энергия, излученная за импульс одним электроном;

N_m — число электронов в микроструктуре на переднем фронте банча;

σ_m — среднеквадратичная длина излучающей микроструктуры электронного банча.

Сравнение экспериментально измеренной зависимости энергии излучения от длины волны с аппроксимацией распределения Гаусса электронов соответствует среднеквадратичному продольному размеру излучающей микроструктуры $\sigma_m = 12$ мкм (см. рис. 7).

Двухцветная генерация излучения в ЛСЭ

В ЛСЭ электронный пучок играет роль активной среды. Проходя последовательно через два ондулятора с разными периодами их магнитных структур, он генерирует одновременно когерентное излучение на двух длинах волн, синхронизированных между собой с точностью до нескольких фемтосекунд. На ЛСЭ FLASH установлено два ондулятора, один из которых работает в УФ-области ($\lambda > 6,5$ нм), другой — в ИК-области ($\lambda = 1—200$ мкм). УФ-ондулятор осуществляет генерацию излучения с длительностью ~30 фс и мощностью около 10 ГВт, длительность ИК-излучения варьируется в пределах 0,3—6 пс (рис. 8).

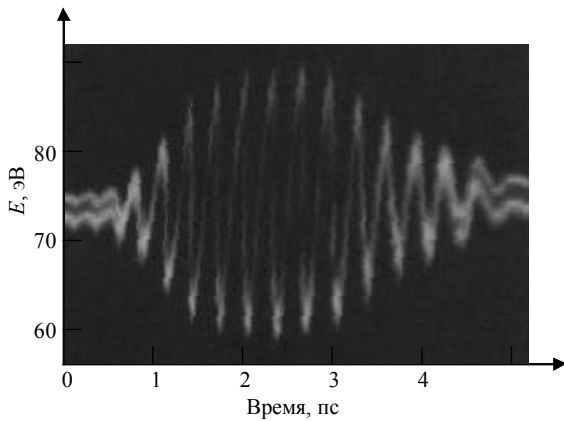


Рис. 8. Зависимость энергии свободных электронов от времени в момент импульса ИК-излучения

Двухцветная генерация полностью синхронизованного излучения в ЛСЭ позволяет осуществлять уникальные эксперименты, которые направлены, с одной стороны, на создание возмущения системы с помощью излучения на первой длине волны, с другой стороны — на измерение отклика от этого возмущения с помощью излучения со второй длиной волны, полностью синхронизованной с излучением на первой длине волны (pump-probe experiments).

Один из первых таких экспериментов реализован на FLASH [7]. Излучение УФ-ондулятора с длиной волны 13,5 нм (энергия гамма-квантов около 78 эВ), проходящее через вакуумную камеру, наполненную криптоном, приводит к ионизации $4p$ -электронов атомов криптона. В момент прохождения через газовую камеру импульса ИК-излучения свободные электроны, образовавшиеся при ионизации, ускоряются в электрическом поле этого излучения. Измеряя спектр ускоренных свободных электронов в разные моменты времени, можно определить временную структуру электрического поля ИК-волны.

Поскольку УФ-излучение имеет малую длительность импульса по сравнению с ИК-импульсом излучения, то, точно варьируя задержку между УФ- (запуск системы) и ИК-импульсами излучения, можно экспериментально просканировать и реконструировать структуру электрического поля ИК-импульса. Экспериментально измеренная временная структура импульса электрического поля ИК-излучения (при разных задержках между ИК- и УФ-импульсами) на длине волны $\lambda = 92$ мкм показана на рис. 8.

Электрическое поле ИК-излучения имеет гармоническую форму в соответствии с траекторией электронов в ондуляторе. Огибающая импульса электрического поля ИК-излучения (см. рис. 8) имеет лорен-

цовскую форму благодаря использованию фильтра с относительной полосой пропускания 10 %.

ИК-ондулятор в экспериментах с двухцветной генерацией излучения играет роль стрик-камеры с уникальным разрешением около 100 фс. Как видно из рис. 8, эксперименты с двухцветной генерацией излучения позволяют исследовать динамические структуры с разрешением около 100 фс, что на порядок лучше, чем разрешение стрик-камер.

Диагностика на основе микроканальных пластин

Статистические свойства излучения в ЛСЭ определяются гамма-распределением плотности вероятности излучения $P(E_\gamma)$ фотонов с энергией E_γ [2]

$$P(E_\gamma) = \frac{M^M}{G(M)} \cdot \frac{1}{\langle E_\gamma \rangle} \cdot \exp\left(-\frac{ME_\gamma}{\langle E_\gamma \rangle}\right) \cdot \left(\frac{E_\gamma}{\langle E_\gamma \rangle}\right)^{M-1};$$

$$\sigma_E = \left[(E_\gamma - \langle E_\gamma \rangle)^2 / \langle E_\gamma \rangle^2 \right]^{1/2}.$$

Ширина спектра излучения существенно зависит от режима генерации излучения, имеет максимальное значение для начальной стадии излучения и режима насыщения. Число возбуждаемых мод в импульсе излучения характеризуется параметром $M = 1/\sigma_E^2$, а параметр $M = \sigma_m/c\tau_c$ характеризует отношение длины излучающей микроструктуры банча σ_m и времени когерентного излучения τ_c .

Таким образом, измерение ширины спектра излучения ЛСЭ позволяет определить продольный размер излучающей микроструктуры электронного банча. Относительная ширина спектра излучения в режиме окончания экспоненциального роста составляет $\sigma_E = 72$ % (параметр $M = 1,9$), что при времени $\tau_c \cong 4$ фс соответствует времени излучения 8 фс. Особенность ондуляторного излучения в ЛСЭ — его большой динамический диапазон. Интенсивность излучения возрастает на три—четыре порядка при переходе от спонтанного излучения к режиму насыщения.

Для измерения излучения ЛСЭ FLASH в широком диапазоне длин волн (6,5—30 нм) с большим динамическим диапазоном (рис. 9) разработана диагностика на основе микроканальных пластин (МКП) [2, 6]. Излучение, генерируемое в УФ-ондуляторе FLASH, отражается от тонкой металлической сеточки (или нити) и регистрируется несколькими микроканальными пластинами, установленными под разными углами к падающему излучению из ондулятора.

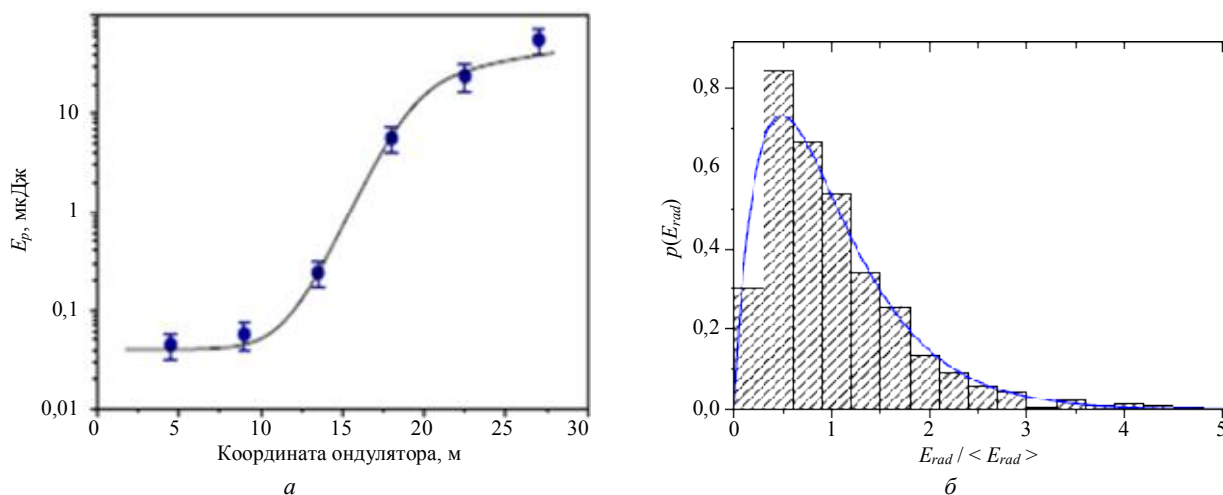


Рис. 9. Излучение ЛСЭ FLASH:

a — зависимость средней энергии, излученной за импульс, от продольной координаты ондулятора;
б — распределение плотности вероятности излучения в режиме окончания экспоненциального роста энергии при $\sigma = 72\%$; $M = 1,9$

В основе МКП-диагностики лежат следующие принципы: сильная зависимость коэффициента отражения от угла приема излучения, длины волны излучения и материала отражателя. Применение отражателей из железа и меди дает возможность проводить эффективные измерения излучения под малыми углами, вплоть до длины волны 6 нм. При больших углах интенсивность отраженного излучения быстро падает при длинах волн менее 10 нм для золотого и железного отражателей. Разместив МКП под разными углами, удастся перекрыть на три порядка динамический диапазон излучения из ЛСЭ. Чтобы обеспечить регистрацию излучения ЛСЭ, разработаны специализированные усилители, перекрывающие динамический диапазон излучения ЛСЭ на пять—шесть порядков.

Ускорительный комплекс для экстремальной ультрафиолетовой литографии

В ОИЯИ ведутся работы над проектом ускорительного комплекса на базе 1,25 ГэВ-сверхпроводящего линейного ускорителя для ЛСЭ, используемого для нанопромышленности и прежде всего для экстремальной ультрафиолетовой (ЭУФ) литографии на длине волны 13,5 нм при средней мощности лазерного излучения ~1,75 кВт, а также для исследований материалов с использованием когерентного рентгеновского и ВУФ-излучений в диапазоне длин волн 2,4—30 нм. Параметры ускорительного комплекса приведены в таблице для разных энергий электронов. Базовым предполагается комплекс ЭУФ-литографии на энергию электронов 1,25 ГэВ, длина ускорительного комплекса

составляет 180 м. Кроме реализации литографии, на ускорительном комплексе планируется проведение медико-биологических исследований в водяном окне от 2,4—4,6 нм, а также исследований магнитных материалов на длине волны около 1,5 нм (на третьей гармонике ЛСЭ). Предполагается, что при создании ускорительного комплекса для ЭУФ-литографии будет реализована та же технология [8], что была использована при сооружении ЛСЭ FLASH. Средняя мощность излучения — один из ключевых параметров для реализации промышленной экстремальной ЭУФ-литографии.

Разрабатываемый в ОИЯИ ЛСЭ будет иметь уникальные параметры, превышающие, в частности, параметры ЛСЭ FLASH в ДФЗИ (см. таблицу). Проектируемый ОИЯИ ЛСЭ будет обеспечивать все импульсные характеристики излучения, достигнутые в настоящее время на FLASH. Однако при этом средняя мощность излучения будет на несколько порядков превышать аналогичную величину на FLASH [8].

Все подсистемы сверхпроводящего линейного ускорителя должны быть оптимизированы для режима работы с частотой повторения 10 Гц при длительности макроимпульса 800 мкс и максимальном подгрузочном токе 10 мА в макроимпульсе. Средняя мощность электронного пучка при энергии 1,25 ГэВ составляет ~100 кВт. Высокая средняя мощность электронного пучка, играющего роль активной среды в ЛСЭ, является основой генерации УФ-лазерного излучения из него с киловаттным уровнем мощности.

Параметры ускорительного комплекса для ЭУФ-литографии

Ускорительный комплекс	FLASH	КЭУЛ-0,68	КЭУЛ-1,25	КЭУЛ-2,5
<i>Параметры ускорителя</i>				
Энергия электронов, ГэВ	0,68	0,68	1,25	2,5
Темп ускорения, МэВ/м	30	31,5	31,5	31,5
Частота, ГГц	1,3	1,3	1,3	1,3
Длина ускорителя, м	250	110	180	250
Материал ВЧ-резонатора	Nb	Nb	Nb	Nb
Пиковый ток пучка, кА	2,5	2,5	2,5	2,5
Заряд электронов в банче, нК	1	1	1	1
R_{ms} разброс энергии, МэВ	0,5	0,5	0,5	0,5
R_{ms} длина банча, мкм	75	75	75	75
Нормализованный эмиттанс пучка, мм-мрад	1,5	1,5	1,5	15
Частота повторения макроимпульсов, Гц	10	10	10	10
Длительность макроимпульса, мс	0,8	0,8	0,8	0,8
Частота повторения микроимпульсов, МГц	9	10	10	10
<i>ЛСЭ для ЭУФ-литографии</i>				
Число импульсов в макроимпульсе	7200	8000	8000	8000
Длина ондулятора, м	27	30	30	30
Магнитное поле, Тл	0,48	0,48	0,82	1,04
Период ондулятора, см	2,73	2,73	3,5	5
Параметр ЛСЭ, ρ	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
FWHM ширина полосы, %	2	2	2	2
Энергия излучения в микроимпульсе, мДж	1,4	8,5	22	33
Энергия излучения в макроимпульсе, Дж	10	68	176	264
Длительность импульса излучения, фс	250	250	250	250
Пиковая мощность излучения, ГВт	5,6	34	88	130
Средняя мощность излучения в макроимпульсе, кВт	14	85	220	330
Средняя мощность, Вт	100	680	1760	2640
FWHM угловая расходимость излучения, мкрад	30	48	54	64
FWHM размер пятна излучения, мм	0,17	0,3	0,2	0,1

Результаты численных расчетов генерации излучения с использованием компьютерного кода FAST в ЛСЭ, проектируемого для ЭУФ-литографии, приведены на рис. 10 [8]. Для электронов с энергией 1,25 ГэВ полная энергия, заключенная в банче, составляет 1,2 Дж. При энергиях электронов в диапазоне 0,68—1,25 ГэВ энергия излучения нарастает заметно быстрее, чем по линейному закону, в то время как в интервале энергий 1,25—2,5 ГэВ она растет заметно медленнее $E_{rad} \propto E_e^{0,6}$.

При энергии электронов $E_e = 680$ МэВ излученная за микроимпульс энергия равна 8,5 мДж, при $E_e = 1,25$ ГэВ — 22 мДж, а при $E_e = 2,5$ ГэВ — 33 мДж.

Пиковая мощность излучения составляет 80 ГВт, при этом длительность импульса излучения (ширина по полувысоте) равна 250 фс. В результате средняя мощность излучения при частоте повторения микроимпульсов 10 МГц и частоте следования макроимпульсов 10 Гц для ускорительного комплекса на энергию электронов 1,25 ГэВ составляет 1,75 кВт.

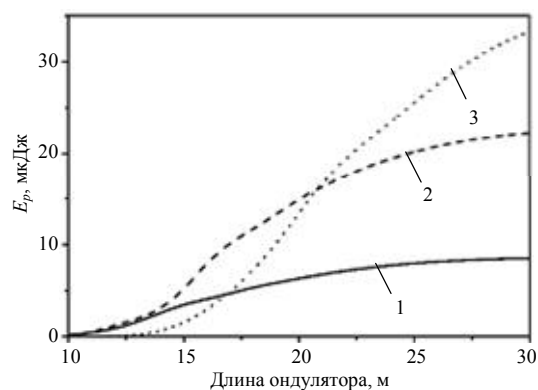


Рис. 10. Зависимость энергии, излученной в ЛСЭ за микроимпульс, от длины ондулятора при разных значениях электронов:
1 — $E_e = 680$ МэВ; 2 — $E_e = 1,25$ ГэВ; 3 — $E_e = 2,5$ ГэВ

Для электронов с энергией 680 МэВ средняя мощность излучения равна 0,68 кВт, с энергией электронов 2,5 ГэВ — 2,6 кВт. При средней мощности излучения 1,75 кВт ускоритель может работать параллельно на девять литографических станций, направляя в каждую из них среднюю мощность 200 Вт. Ширина спектра излучения со-

ставляет менее 2 % и полностью удовлетворяет требованиям ЭУФ-литографии. Угловая ширина на полувывоте составляет 54 мкрад, а ширина пятна излучения в ближней зоне — 0,2 мм для электронов с энергией 1,25 ГэВ.

Выполненные расчеты показали, что параметры лазерного излучения полностью удовлетворяют и требованиям пространственной когерентности.

Литература

1. *Andruszkow J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 3825.
2. *Ackerman W. et al.* // Nature Photonics. 2007. V. 1. P. 336.

3. *Derbenev Ya. S., Kondratenko A. M., Saldin E. L.* // Nucl. Instrum. and Methods 193. 1982. P. 415.

4. *Holler Y. et al.* Magnetic measurements of the FLASH infrared undulator // Proc. FEL07. 2007. P. 318.

5. *Gensh M. et al.* // Infrared physics and technology. 2008. V. 51. P. 423.

6. *Brovko O. et al.* Diagnostic of ultrashort electron bunches developed at JINR// RUPAC 08. 2008. P. 304.

7. *Gensh M. et al.* THz undulator beam line at FLASH: Towards a THz XUV pump probe user facility // Proc. FEL 09.

8. *Saldin E. et al.* Potential of the FLASH FEL technology for construction of a kW-scale light source for next generation lithography // Там же.

Formation and diagnostic of FEL ultrashort electron bunches

*O. I. Brovko, R. S. Makarov, E. A. Matyushevskiy, N. A. Morozov,
E. M. Syresin, M. V. Yurkov*

Joint Institute for Nuclear Research, 6 J. Cuiry str., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia

E-mail: obrovko@list.ru

Formation and diagnostic of ultrashort electron bunches are discussed for FEL like FLASH, XFEL and FEL applied for extreme ultraviolet lithography. The main peculiarity of these accelerator complexes is related to formation of ultrashort electron bunches with r.m.s. length of 50 μm. Novel diagnostics are required to provide femtoscale time resolution in the modern FEL like FLASH, and future XFEL and extreme ultraviolet lithography projects. The infrared undulator constructed at JINR and installed at FLASH is used for longitudinal bunch shape measurements and for two-color lasing provided by the FIR and VUV undulators. Two-color lasing in pump-probe experiments permits to investigate dynamics of atomic and molecular systems with time resolution of 100—500 fs. A special diagnostic based on micro channel plates was developed for measurement of FEL radiation at wave length of 6.5—30 nm.

PACS: 41.75.-i

Keywords: free electron laser, electron bunch, undulator, wave, diagnostics.

Bibliography — 8 references.

Received 18 November 2009