

## ДИАГНОСТИКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ БАНЧЕЙ В ЛСЭ И ILC НА ОСНОВЕ ОНДУЛЯТОРНОГО И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Б. Ж. Залиханов, Р. С. Макаров, Е. А. Матюшевский, Н. А. Морозов,  
Е. М. Сыресин, М. В. Юрков*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Диагностика ультракоротких электронных банчей, разрабатываемая на основе ондуляторного и синхротронного излучения в сотрудничестве ОИЯИ–DESY, предназначена для международного линейного коллайдера ILC, а также для лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), таких как FLASH или рентгеновский лазер XFEL. Во всех этих ускорительных комплексах требуется диагностика ультракоротких электронных банчей с длиной 20–300 мкм.

Different methods for diagnostics of ultrashort electron bunches developed on the basis of synchrotron and undulator radiation were realized at JINR–DESY collaboration within the framework of the FLASH and XFEL projects and JINR participation in the ILC project. The main peculiarity of these accelerator complexes is related to formation of ultrashort electron bunches with r.m.s. length of 20–300  $\mu\text{m}$ .

PACS: 29.20.-c; 29.20.Ej; 29.90.+g

### ДИАГНОСТИКА УЛЬТРАКОРОТКИХ БАНЧЕЙ В ЛСЭ НА ОСНОВЕ ОНДУЛЯТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Измерение продольного профиля электронного банча в ЛСЭ FLASH [1, 2] основано на измерении ондуляторного излучения на длинах волн, сравнимых с продольной длиной электронного банча [3–6] (см. табл.). Для измерения продольного профиля банча на ЛСЭ FLASH в ОИЯИ разработан специализированный ондулятор (рис. 1), производящий излучение в диапазоне от 1–200 мкм [3–6].

В ходе измерений спектра ондуляторного излучения обнаружилось, что существует сдвиг между измеренной длиной волны и расчетным значением  $\lambda$  на уровне  $(8 \pm 1)\%$  [6]. Оказалось, что этот сдвиг обусловлен наличием высших гармоник магнитного поля в ондуляторе (рис. 2). В присутствии высших гармоник магнитного поля параметр ондуляторности равен

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

**Параметры экспериментов на FLASH с ИК-ондулятором ОИЯИ**

Энергия электронов, ГэВ	0,5–1
Заряд электронов банча, нКл	1
Среднеквадратичная длина банча, мкм	50
Среднеквадратичная длина излучающей микроструктуры банча, мкм	10–15
Нормализованный эмиттанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	1–1,5
Магнитное поле, Тл	0,1–1,1
Период, см	40
Число периодов	9
Длина волны, мкм	1–200
Пиковая мощность, МВт	4
Энергия, излученная в импульсе, мкДж	4
Длительность импульса, пс	0,5–6

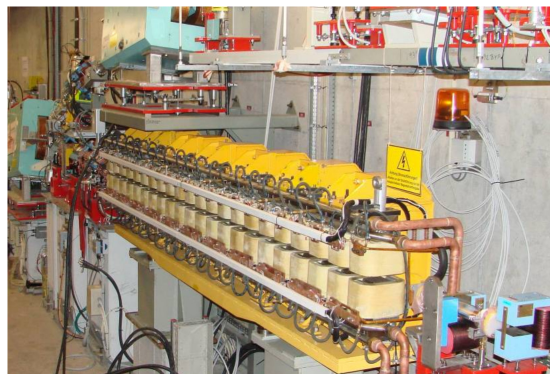


Рис. 1. Инфракрасный ондулятор ОИЯИ, установленный на ЛСЭ FLASH

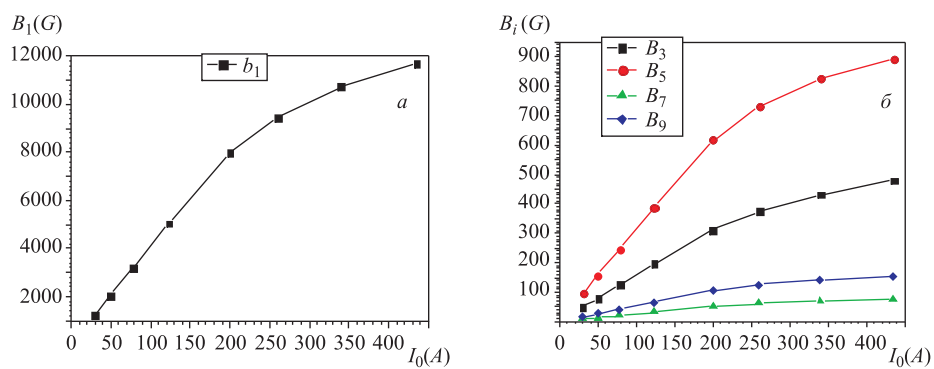


Рис. 2. Первая и другие высшие гармоники магнитного поля ИК-ондулятора

Спектры инфракрасного излучения для разных параметров ондуляторности приведены на рис. 3, *a* [5]. Спектр излучения измерен с помощью ИК-камеры, работающей в диапазоне 1–1000 мкм. Длительность импульса ИК-излучения из ондулятора равна  $T = N_{\text{und}}\lambda/c$ , где  $N_{\text{und}} = 9$  — число периодов ондулятора. В зависимости от длины волны длительность импульса излучения, измеренная с использованием электрооптической техники, варьируется от 0,3 до 6 пс (рис. 3, *б*).

Зависимость энергии, излученной за импульс, от длины волны излучения приведена на рис. 4. Максимальная величина энергии, излученной за импульс, в экспериментах составила 4 мкДж для электронного банча с зарядом 0,5 нКл при энергии электронов 700 МэВ [6]. Генерация ИК-излучения обусловлена микроструктурой переднего фронта банча, где происходит резкое возрастание импульсного тока [2]. Энергия излучения электронов с гауссовым распределением, находящихся в излучающей микроструктуре переднего фронта банча, равна  $\Delta E_{\text{und}} = \Delta \varepsilon_e N_m^2 \exp(-2\pi\sigma_m/\lambda)^2$ , здесь  $\Delta \varepsilon$  — энергия излучения одним электроном,  $N_m$  — число электронов в микроструктуре,  $\sigma_m$  — среднеквадратичная длина излучающей микроструктуры электронного банча. Сравнение экспериментально измеренной зависимости энергии излучения от длины волны с аппроксимацией гауссовского распределения электронов соответствует среднеквадратичному продольному размеру излучающей микроструктуры  $\sigma_m = 12$  мкм (рис. 4).

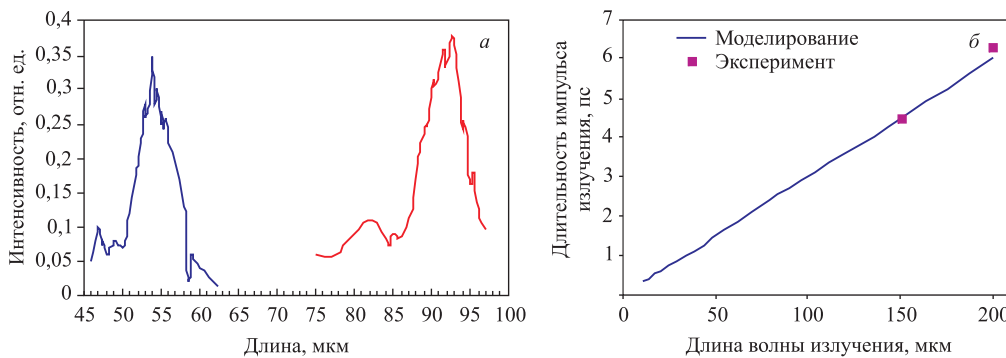


Рис. 3. Спектры ИК-излучения для различных значений параметра ондуляторности (*a*). Длительность импульса ИК-излучения для разных длин волн (*б*)

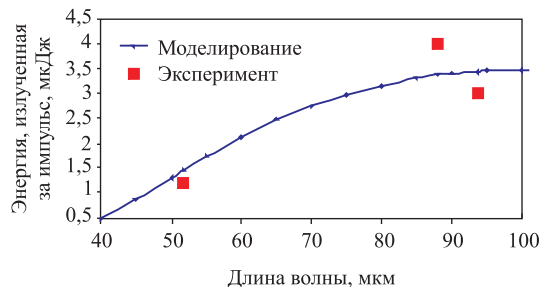


Рис. 4. Зависимость энергии, излученной за импульс, от длины волны

### ДВУХЦВЕТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛСЭ

В ЛСЭ электронный пучок, проходя последовательно через два ондулятора с разными периодами их магнитных структур, генерирует когерентное излучение на двух длинах волн, синхронизованных между собой с точностью до нескольких фс. На ЛСЭ FLASH установлено два ондулятора, один из которых работает в ультрафиолетовой области ( $\lambda > 6,5$  нм), другой — в инфракрасной области ( $\lambda = 1\text{--}200$  мкм). Ультрафиолетовый ондулятор генерирует излучения с длительностью около 30 фс, длительность ИК-излучения варьируется от 0,3 до 6 пс.

Двухцветная генерация полностью синхронизованного излучения в ЛСЭ позволяет осуществить уникальные эксперименты. Они направлены, с одной стороны, на создание возмущения некоторой системы с помощью излучения на первой длине волны, а с другой — 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 [6]. Излучение УФ-ондулятора с длиной волны 13,5 нм (энергия гамма-квантов — около 100 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, можно определить временную структуру электрического поля ИК-волны. Поскольку УФ-излучение имеет малую длительность импульса по сравнению с ИК-излучением, то, точно варьируя задержку между УФ-импульсами (запуск системы) и ИК-импульсами излучения, можно просканировать и экспериментально 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  $\lambda = 90$  мкм показана на рис. 5.

Электрическое поле ИК-излучения имеет гармоническую форму в соответствии с траекторией электронов в ондуляторе. Огибающая импульса электрического поля ИК-излучения (см. рис. 5) имеет лоренцевскую форму благодаря использованию фильтра с относительной полосой пропускания 10 %.

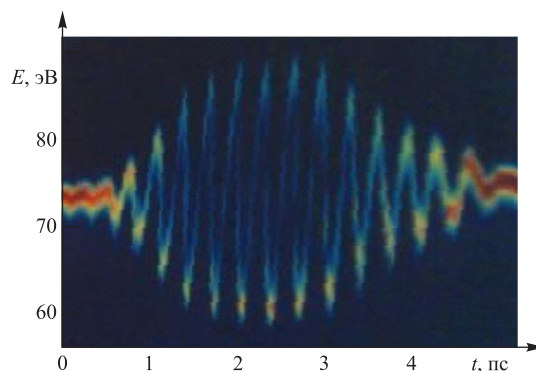


Рис. 5. Зависимость энергии свободных электронов от времени при сканировании импульса ИК-излучения

ИК-ондулятор в экспериментах с двухцветной генерацией излучения играет роль «стрик-камеры» с разрешением около 100 фс. Как видно из рис.5, эксперименты с двухцветной генерацией излучения позволяют исследовать различные динамические структуры с разрешением около 100 фс, что на порядок лучше, чем разрешение стрик-камер.

### ДИАГНОСТИКА НА ОСНОВЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИЛС

Электроны/позитроны, проходя через дипольные магниты спектрометра энергии ИЛС [7], излучают синхротронное излучение (СИ). В ОИЯИ разработан метод измерения средней энергии электронов банча ИЛС на основе синхротронного излучения с разрешением  $\Delta E/E \cong 5 \cdot 10^{-5}$  [8]. Критическая энергия гамма-квантов в спектрометре ИЛС составляет 30 МэВ, при измерении средней энергии электронов банча регистрируются только относительно мягкие гамма-кванты с энергией до 20 кэВ. Измерив положение горизонтального края пятна СИ с разрешением 3 мкм на расстоянии около 50 м от спектрометра, можно определить среднюю энергию электронов банча с требуемым выше разрешением [8].

Прототип газонаполненного детектора с усилением для измерения СИ из магнитов спектрометра ИЛС был разработан и изготовлен в ОИЯИ. Он представляет собой стриповый детектор, состоящий из 48 каналов с разрешением 10 мкм, заполненный ксеноном при давлении 60 атм. Пробег гамма-квантов с энергией 20 кэВ в нем составляет около 0,2 мм. Анод детектора состоит из стриповых алюминиевых слоев толщиной 4 мкм, изолированных друг от друга диэлектрическими слоями толщиной 6 мкм. В качестве катода используется бериллиевая фольга толщиной 1 мм, установленная во входном окне детектора. Высоковольтное напряжение приложено между катодом и анодом, находящимися на расстоянии 1 мм друг от друга. Гамма-кванты СИ, пролетев через входное бериллиевое окно детектора, приводят к ионизации атомов ксенона и образованию вторичных электронов. Вторичные электроны создают лавину с коэффициентом усиления около 10 в катод-анодном промежутке. Заряд электронов лавины регистрируется на аноде проводящими стриповыми слоями, что, в конечном счете, позволяет измерить профиль горизонтального края пятна СИ.

В настоящее время закончены испытания детектора на высокое давление, проведены высоковольтные тесты и начались калибровочные эксперименты с источниками гамма-квантов диапазона 10–100 кэВ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. *Holler Y. et al.* // Proc. of FEL'07. 2007. P. 318.
4. *Gensh M. et al.* // Infrared Physics and Technology. 2008. V. 51. P. 423.
5. *Brovko O. et al.* // RUPAC 08. 2008. P. 304.
6. *Gensh M. et al.* THz Undulator Beam Line at FLASH: Towards a THz XUV Pump Probe User Facility // Proc. of FEL'09. 2009.
7. *Duginov V. N. et al.* LC-DET 2004-031. DESY. 2004.
8. *Hiller K. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 585. P. 1191.