

ДЕТЕКТОРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

*Е. Сыресин^{а,1}, О. Бровко^а, А. Гребенцов^а, Н. Замятин^а, А. Шабун^а,
М. Юрков^{а,б,2}, Я. Грюнерт^б, В. Фрюенд^{б,3}, Д. Новиков^б, Р. Баста^з,
Т. Фиала^з, П. Хедбавны^{з,4}*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б DESY, Гамбург, Германия

^б European XFEL, GmbH, Гамбург, Германия

^з «Вакуум-Прага», Прага

Детекторы на основе микроканальных пластин успешно используются для регистрации излучения лазеров на свободных электронах, разработанных для коротковолновых диапазонов длин волн. В статье представлены описания детекторов излучения для лазера на свободных электронах FLASH (DESY, Гамбург), работающего в диапазоне длин волн вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения (4–100 нм), а также детекторов для строящегося европейского рентгеновского лазера XFEL (Гамбург), излучающего в рентгеновском диапазоне длин волн от 0,05 до 4,3 нм.

Micro channel plate photon detectors are successfully used at short wavelength free electron lasers. In this paper we describe photon detectors developed for free electron laser FLASH (DESY, Hamburg) operating in the vacuum ultraviolet and soft x-ray wavelength range (4–100 nm), and detectors for the European X-ray free electron laser (European XFEL) operating in the wavelength range 0.05–4.3 nm.

PACS:29.20.-c; 29.25.-t

ВВЕДЕНИЕ

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), работающие в рентгеновском диапазоне, — это устройства, усиливающие электромагнитное излучение за один пролет электронного пучка в ондуляторе [1]. Оптимизация процесса усиления и успешность настройки ЛСЭ существенно зависят от возможностей и качества детекторов, используемых для регистрации излучения. Особенности детекторов излучения для рентгеновских ЛСЭ определяются большой величиной динамического диапазона интенсивности излучения, возрастающей на 4–6 порядков от уровня спонтанной эмиссии до максимума в режиме насыщения [2, 3].

¹E-mail: syresin@nu.jinr.ru

²E-mail: mikhael.yurkov@desy.de

³E-mail: WOLFGANG.FREUND@XFEL.EU

⁴E-mail: tech@vakuum.cz

Для обеспечения быстрого и надежного детектирования признаков усиления и тонкой настройки процесса усиления требуется высокая точность относительных измерений энергии излучения в микроимпульсе (1 %) во всем динамическом диапазоне интенсивностей излучения. Требования по перекрываемому диапазону длин волн составляют величину около двух порядков. Детекторы излучения на основе микроканальных пластин (МКП), использующие различные приемы управления потоком фотонов на детектор, удовлетворяют указанным требованиям. Так, при работе в вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазоне эффективным приемом является применение мишеней, рассеивающих излучение на детектор. Примером являются детекторы излучения на установке FLASH, работающие в ультрафиолетовом диапазоне длин волн от 4 до 100 нм и обеспечивающие регистрацию излучения от уровня 1 нДж, соответствующего спонтанной эмиссии, до величины 0,5 мДж [3–7]. Для строящегося европейского рентгеновского лазера XFEL [8], излучающего в диапазоне длин волн от 0,05 до 5 нм, детекторы на основе МКП и кремниевых фотодиодов обеспечивают регистрацию энергии излучения за микроимпульс от 1 нДж до 25 мДж при ее относительной точности измерения 1 %. Энергия в импульсе излучения измеряется фотодиодом и традиционной МКП с анодом. Наряду с этими измерениями в детекторе регистрируется положение центра тяжести фотонного пучка с помощью МКП с фосфорным экраном в качестве анода.

1. МКП-ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ЛСЭ FLASH

Лазер на свободных электронах ВУФ-диапазона FLASH в DESY работает с 2000 г. [4–7]. Первая в мире генерация излучения ЛСЭ и достижение предельных мощностей в ВУФ-диапазоне были зарегистрированы на тестовой установке TTF FEL (прототип FLASH). Регистрация излучения и настройка ЛСЭ производились с помощью детектора на основе МКП [3]. Детектор находился на расстоянии 18,5 м от выхода ондулятора. Детектор первого поколения (рис. 1) состоял из двух МКП, регистрирующих излучение, рассеянное на золотой проволочке под малыми углами и углами, близкими к 180°, а также кристалла CeYAG, предназначенного для визуализации изображения фотонного пучка.

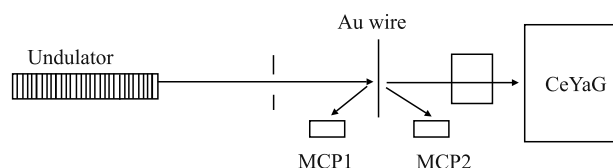


Рис. 1. Схема МКП-детектора первого поколения

В 2004 г. энергия электронов в ускорителе была увеличена до 700 МэВ и создан детектор второго поколения [9]. С помощью этого детектора было измерено экспоненциальное поведение усредненной энергии излучения в микроимпульсе в зависимости от длины ондулятора (рис. 2, а) [7]. Детектор второго поколения состоял из двух идентичных секций, каждая из которых содержала перемещаемые мишени (первая мишень — золотая проволочка диаметром 250 мкм, вторая мишень — золотая сетка из проволоки диаметром 60 мкм с прозрачностью 65 %). Две МКП детектировали фотоны, рассеянные на мишени на малые углы, другие две МКП — на большие углы соответственно.

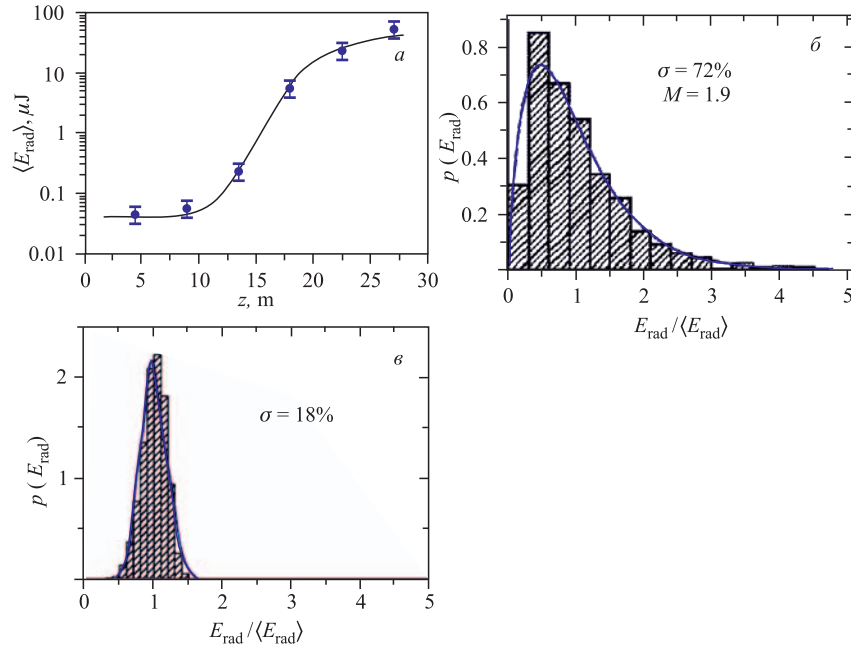


Рис. 2. Энергия излучения в микроимпульсе и ее флуктуации. а) Зависимость усредненной энергии излучения в микроимпульсе от длины ондулятора. б) Вероятность распределения энергии излучения в микроимпульсе в режиме экспоненциального роста интенсивности излучения. в) Вероятность распределения энергии излучения в микроимпульсе в режиме насыщения излучения в ЛСЭ

Положения МКП относительно мишени выбирались таким образом, чтобы их аксептансы для малых и больших углов отличались в 300 раз, но при этом осуществлялось перекрытие измеряемых диапазонов энергии излучения каждой из МКП при некоторой промежуточной интенсивности излучения.

Энергия излучения флуктуирует от микроимпульса к микроимпульсу из-за статических свойств дробового шума пучка. Флуктуации излучения растут с увеличением длины ондулятора, достигая максимума в конце режима экспоненциального роста. В режиме насыщения флуктуации резко снижаются [10, 11]. На рис. 2, б приведено распределение энергии излучения в микроимпульсе для режима экспоненциального роста при средней энергии излучения 1 мкДж. На рис. 2, в показано распределение энергии излучения уже в режиме насыщения при средней энергии излучения, равной 40 мкДж. Распределение энергии излучения в микроимпульсе соответствует гамма-распределению [10, 11]:

$$P(E) = \frac{M^M}{\Gamma(M)} \left(\frac{E}{\langle E \rangle} \right)^{M-1} \frac{1}{\langle E \rangle} \exp \left(-M \frac{E}{\langle E \rangle} \right),$$

где $\Gamma(M)$ — гамма-функция, параметр $M = 1/\sigma_E^2$, $\sigma_E^2 = \langle (E - \langle E \rangle)^2 \rangle / \langle E \rangle^2$. Параметр M характеризует число мод в импульсе излучения. Кроме того, параметр равен отношению длины излучающей части банча σ_z ко времени когерентного излучения τ_c , умноженному на скорость света c : $M = \sigma_z / c\tau_c$. Экспериментальные результаты на рис. 2, б соответствуют гамма-распределению с параметром $M = 1,9$ и длительности импульса излучения в режиме экспоненциального роста, равной (8 ± 1) фс.

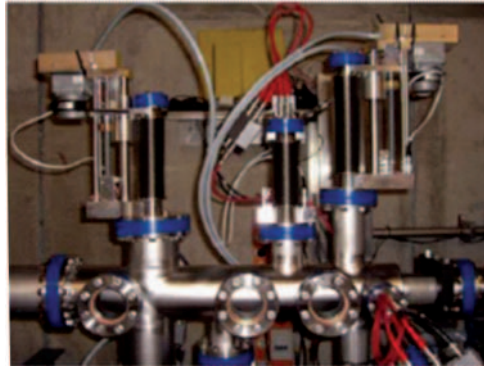
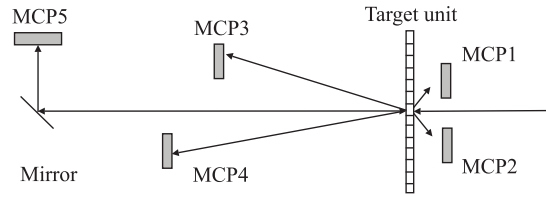


Рис. 3. Схема и вид МКП-детектора третьего поколения с пятью МКП

Таким образом, применение МКП в ЛСЭ FLASH позволило определить длительность импульса рентгеновского излучения, находящуюся в фемтосекундном диапазоне, число мод излучения и время когерентности.

После усовершенствования ускорителя в 2010 г. на FLASH достигнута энергия электронов 1,25 ГэВ и реализована генерация излучения при длине волны 4 нм [12]. Для регистрации излучения был разработан детектор третьего поколения на основе МКП (рис. 3) [9, 13]. В детекторе использовано пять МКП. Детектирование излучения, отраженного на угол, близкий к 180° , осуществляется двумя стационарными МКП. Излучение под малыми углами детектируется с помощью двух подвижных МКП. Для измерения прямого потока излучения используется пятая МКП. Наряду с золотой сеткой в новой детекторной системе дополнительно установлено еще три мишени: две железные сетки с пропускной способностью 88 и 79 % соответственно, а также медная сетка с пропускной способностью 60 %. Применение нового МКП-детектора позволяет проводить измерения во всем диапазоне длин волн (4–50 нм) и во всем диапазоне интенсивностей (от долей нДж до 1 мДж).

2. ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ МКП И КРЕМНИЕВЫХ ФОТОДИОДОВ ДЛЯ XFEL

Три детекторные системы на основе МКП и кремниевых фотодиодов [14, 15] планируются установить на строящемся европейском рентгеновском лазере XFEL. Основное назначение детекторов состоит в регистрации и тонкой настройке процесса усиления излучения. Детекторы используются для измерения в широком динамическом диапазоне — от энергии излучения в микроимпульсе 1 нДж, соответствующей спонтанной эмиссии, до энергии излучения в режиме насыщения 25 мДж. Детекторы работают в широком диа-

пазоне длин волн от 0,05 до 0,4 нм для ондуляторов жесткого рентгеновского излучения (SASE1 и SASE2) и от 0,4 до 4,3 нм для ондулятора мягкого рентгеновского излучения SASE3. Детекторы на XFEL должны: регистрировать энергию излучения в микроимпульсе с относительной точностью лучше 1%; осуществлять измерение положения пучка фотонов и визуализацию изображения как отдельного импульса, так и усредненного изображения от последовательности импульсов; выполнять регистрацию в соответствии с временной структурой XFEL (с частотой повторения макроимпульсов 10 Гц и частотой повторения микроимпульсов 4,5 МГц).

Детекторы на основе МКП для XFEL планируется установить после отклоняющих зеркал, предназначенных, во-первых, для ослабления интенсивности излучения при его отражении под углом больше некоторого критического угла, во-вторых, для обрезания высоких гармоник ондуляторного излучения с целью увеличения отношения интенсивности излучения ЛСЭ к уровню его спонтанной эмиссии. Наряду с ослаблением интенсивности излучения при отражении от зеркал в XFEL осуществляется дополнительное ослабление интенсивности с помощью плоских алмазных поглотителей. Использование этих технологий позволяет изменять интенсивность излучения, достигающую детектора, в диапазоне от 1 до 10^4 . С учетом собственного динамического диапазона МКП 10^3 динамический диапазон всей детекторной системы составляет величину 10^7 .

Детекторы для ондуляторов SASE1 и SASE2 (рис. 4) включают три МКП F4655 фирмы «Hamamatsu», предназначенные для регистрации энергии излучения в микро-

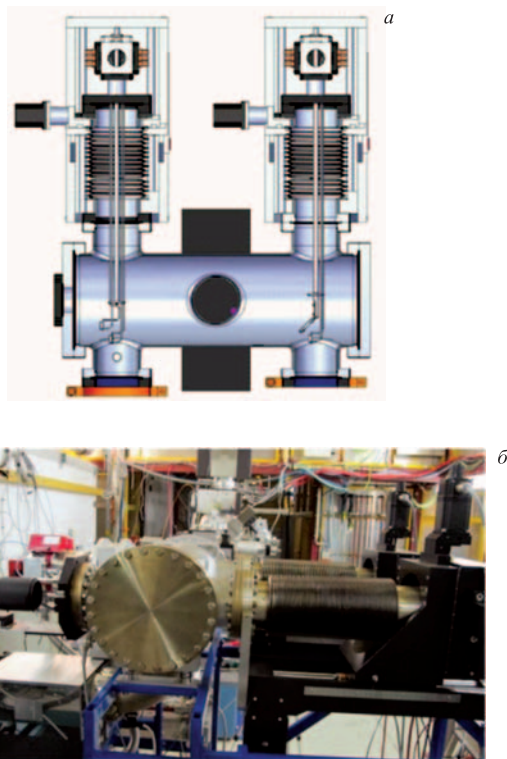


Рис. 4. Схема и вид МКП-детектора для систем SASE1 и SASE2 XFEL

импульсе, кремниевый фотодиод и МКП модели BOS-40-IDA-CN/P-47 с фосфорным экраном в качестве анода (рис. 4, *a*). Диаметр МКП F4655 равен 18 мм, диаметр МКП для регистрации изображения фотонного пучка составляет 40 мм. Две МКП F4655 и фотодиод установлены в первом порту детектора. Детектор изображения и одна МКП F4655 размещены во втором порту. Для поиска положения фотонного пучка используются трехкоординатные манипуляторы фирмы «Vab» PM 100-250, позволяющие перемещать детекторы в горизонтальном направлении на 250 мм и в вертикальном направлении на ± 25 мм. Детекторы изображения расположены под углом 45° к направлению распространения фотонного пучка, чтобы обеспечить передачу изображения на видеокамеру.

Детектор для ондулятора SASE3 предназначен для измерения параметров фотонного пучка в диапазоне длин волн 0,4–4,3 нм. Детектор для ондулятора SASE3 будет обладать дополнительным портом с подвижными полупрозрачными сеточными и проволочными мишенями для получения рассеянного излучения подобно тому, как это было реализовано в ЛСЭ FLASH [9, 13].

3. ТЕСТОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МКП

Перед установкой детекторов на XFEL осуществлена их калибровка излучением с длинами волн, находящимися в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Для калибровки в ультрафиолетовом диапазоне была использована лампа, генерирующая излучение в данном диапазоне длин волн. Зависимость коэффициента усиления МКП от высоковольтного напряжения на ней показано на рис. 5. При вариации высоковольтного напряжения, приложенного к МКП, от 1,5 до 2,1 кВ коэффициент усиления возрастает на четыре порядка. Отметим, что при напряжении менее 1,4 кВ существенную роль в каналах МКП играют эффекты пространственного заряда. Эта величина напряжения является минимальной, при которой используется МКП F4655.

Дальнейшие тесты с МКП для системы SASE1 были выполнены в рентгеновском диапазоне излучения на синхротроне DORIS [16]. Абсолютные измерения энергии излучения в микроимпульсе $E_{из}$ выполнены с мощностью МКП и полупроводникового фотодиода

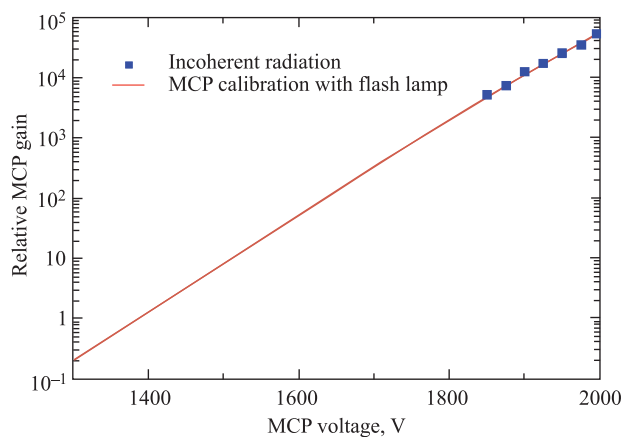


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления МКП F4655 от приложенного к ней высоковольтного напряжения

при $E_{\text{из}} > 0,03$ нДж, энергии фотонов 8,5–12 кэВ и времени повторения микроимпульсов 192 или 96 нс. Детекторы работали при потоке фотонов $4 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. Давление в вакуумной камере детектора составило $5 \cdot 10^{-9}$ мбар. Бериллиевая фольга толщиной 200 мкм была установлена на входе в вакуумную камеру детектора. Ионизационная камера размещалась перед входом МКП-детектора и предназначалась для измерения потока синхротронного излучения. Зависимость сигнала МКП от сигнала ионизационной камеры приведена на рис. 6 при энергии фотонов 9,66 кэВ и четырех значениях высоковольтного напряжения на МКП 1,8, 1,85, 1,9 и 2 кВ. При высоковольтном напряжении 1,9 и 2 кВ наблюдается заметное влияние вторичных ионов, образованных в вакуумной камере детектора при ионизации атомов остаточного газа рентгеновскими γ -квантами. При напряжении 1,8 и 1,85 кВ сигнал МКП линейно растет с увеличением сигнала ионизационной камеры. Отношение МКП-сигнала к энергии излучения за микроимпульс равно 0,165 В/нДж при напряжении 1,8 кВ и энергии фотонов 9,66 кэВ.

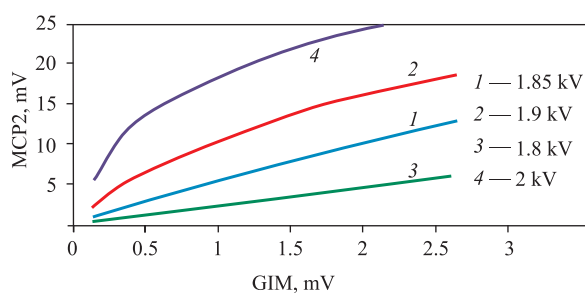


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Зависимость сигнала МКП от сигнала ионизационной камеры при разных значениях высоковольтного напряжения и энергии фотонов 9,66 кэВ

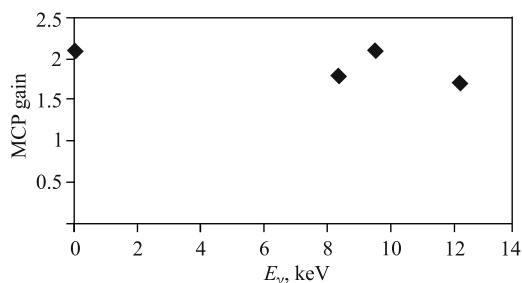


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления МКП от энергии фотонов при изменении высоковольтного напряжения от 1,8 до 1,85 кВ

Усиление сигнала с МКП при увеличении высоковольтного напряжения с 1,8 до 1,85 кВ приведено на рис. 7 в зависимости от энергии гамма-квантов. Коэффициент усиления равен $K = 2,1$, и он не зависит от энергии гамма-квантов в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

Ожидается, что для XFEL энергия излучения в микроимпульсе, равная 1 мДж, приведет к уровню сигнала в МКП 1,2 В при приложенном к ней напряжении 1,5 кВ (при этом напряжении сигнал с МКП будет уменьшен на два порядка по сравнению с напряже-

нием 1,8 кВ) и коэффициенте ослабления излучения, отраженного зеркалами, $R = 10^{-3}$ для калибровочного отношения 0,165 В/нДж при напряжении на МКП 1,8 кВ.

Измерение потока фотонов синхротронного излучения (СИ) проведено с помощью кремниевое фотодиода и ионизационной камеры. Линейная зависимость тока фотодиода от сигнала с ионизационной камеры показана на рис. 8. Максимальный ток фотодиода $I = 105 \text{ мкА}$ соответствует потоку фотонов $2,4 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

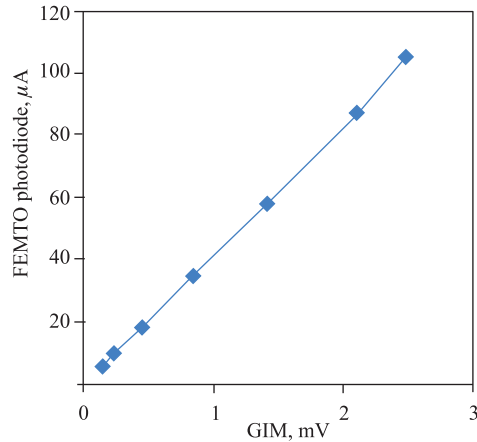


Рис. 8. Зависимость тока фотодиода от сигнала ионизационной камеры

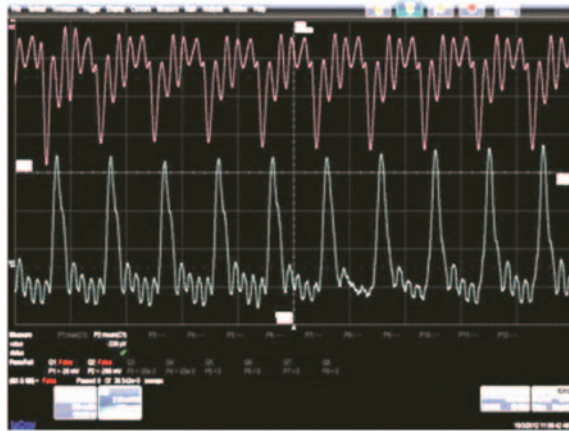


Рис. 9. Сигнал с МКП и фотодиода при времени повторения импульсов излучения 96 нс

Временная структура микроимпульсов СИ измерена с помощью фотодиода и МКП при их частоте повторения около 10 МГц (рис. 9). МКП с фосфорным экраном эффективно использована для поиска положения пучка при интенсивности СИ более $4 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. Необходимо отметить, что при поперечном размере фотонного пучка менее 0,5 мм детектор дает информацию о положении центра тяжести пучка, но не позволяет исследовать его форму вследствие низкого контрастного разрешения экрана и уширения пятна изображения на нем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для ЛСЭ FLASH разработаны и созданы три поколения МКП-детекторов, работающих в ультрафиолетовом диапазоне от 4 до 100 нм, позволившие исследовать генерацию излучения ЛСЭ в широком динамическом диапазоне от спонтанной эмиссии до режима насыщения.

Для европейского рентгеновского лазера XFEL созданы три системы детекторов на основе МКП, работающих в рентгеновском диапазоне от 0,05 до 4,3 нм. Проведена их калибровка с помощью СИ в канале BW1 синхротрона DORIS.

Работы по созданию МКП-детекторов для XFEL выполнены при поддержке контракта RU03 XFEL–ОИЯИ для WP74.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Derbenev Ya. S., Kondratenko A. M., Saldin E. L.* On the Possibility of Using a Free Electron Laser for Polarization of Electrons in Storage Rings // *Nucl. Instr. Meth.* 1982. V. 193. P. 415–421.
2. *Tiedtke K. et al.* The Soft X-Ray Free-Electron Laser FLASH at DESY: Beamlines, Diagnostics, and End Stations // *New J. Phys.* 2009. V. 11. 023029. P. 1–16.
3. *Bytchkov A. et al.* Development of MCP-Based Photon Diagnostics at the TESLA Test Facility at DESY // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2004. V. 528. P. 254–257.
4. *Ayvazyan V. et al.* Generation of GW Radiation Pulses from a VUV Free-Electron Laser Operating in the Femtosecond Regime // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. 104802. P. 1–4.
5. *Ayvazyan V. et al.* A New Powerful Source for Coherent VUV Radiation: Demonstration of Exponential Growth and Saturation at the TTF Free-Electron Laser // *Eur. Phys. J. D.* 2002. V. 20. P. 149–156.
6. *Ayvazyan V. et al.* A New Powerful Source for Coherent VUV Radiation: First Operation of a Free-Electron Laser Generating GW Power Radiation at 32 nm Wavelength // *Eur. Phys. J. D.* 2006. V. 37. P. 297–306.
7. *Ackermann W. et al.* Operation of a Free Electron Laser from the Extreme Ultraviolet to the Water Window // *Nature Photonics.* 2007. V. 1. P. 336–342.
8. XFEL: The European X-Ray Free-Electron Laser Technical Design Report / Eds. Altarelli M. et al. Preprint DESY 2006-097. Hamburg, 2006. 629 p. <http://xfel.desy.de>.
9. *Bittner L. et al.* MCP-Based Photon Detector with Extended Wavelength Range for FLASH // *Proc. of FEL2007 Conf.* P. 334–337.
10. *Saldin E. L., Schneidmiller E. A., Yurkov M. V.* Statistical Properties of Radiation from VUV and X-Ray Free Electron Laser // *Opt. Commun.* 1998. V. 148. P. 383.
11. *Saldin E. L., Schneidmiller E. A., Yurkov M. V.* The Physics of Free Electron Lasers. Berlin: Springer, 1999. 464 p.
12. *Honkavaara K. et al.* Status of the FLASH Facility // *Proc. of FEL 2013.* P. 550–553.
13. *Brovko O. et al.* Diagnostics Development at JINR for ILC and FEL Ultrashort Electron Bunches // *Part. Nucl., Lett.* 2010. V. 7, No. 1(157). P. 78–86.
14. *Syresin E. et al.* Development of MCP Based Photon Detectors for the European XFEL // *IPAC 2011, San-Sebastian, Spain, 2011.* P. 1299–1301.
15. *Brovko O. et al.* Diagnostic Technique with Femtosecond Resolution Applied for FEL Electron Bunches // *RUPAC 12, Saint-Petersburg, Russia, 2012.* P. 572–575.
16. Experimental Stations and Instruments at HASYLAB DORIS III. http://hasyweb.desy.de/science/annual_reports/2006_report/part1/contrib/24/19018.pdf.

Получено 27 марта 2014 г.