

***In-situ* измерение профиля сфокусированного пучка синхротронного излучения флуоресцентным детектором с динамическим диапазоном 10^6**

С. С. Макаров^{1,2,*}, С. А. Пикуз², А. П. Черняев¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Объединенный институт высоких температур Российской
академии наук. 125412, Москва, улица Ижорская, д. 13, стр. 2
(Статья поступила 23.10.2018; Подписана в печать 10.12.2018)

Использование флуоресцентных детекторов считается крайне перспективным для регистрации сверхинтенсивных пучков рентгеновского излучения. Это связано с рядом преимуществ таких детекторов по сравнению с традиционными регистрирующими устройствами (такими как ПЗС-матрицы, фотодиоды, рентгеновские пленки и др.). В частности, данный тип детекторов имеет субмикронное пространственное разрешение, одновременно с большим полем зрения (до нескольких см²). Также известно, что динамический диапазон флуоресцентного детектора кристалла фторида лития (LiF) для мягкого рентгеновского излучения значительно превышает величину динамического диапазона стандартных детекторов 10^4 . В рамках данной работы продемонстрирована возможность *in-situ* измерения профиля сфокусированного рентгеновского излучения со сверхшироким динамическим диапазоном 10^6 при помощи детектора LiF и конфокального лазерного сканирующего микроскопа.

PACS: 42.79.Pw

УДК: 53.083.9

Ключевые слова: синхротронное излучение, кристалл фторида лития LiF, центры окраски, динамический диапазон, конфокальный лазерный сканирующий микроскоп.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня для изучения строения вещества учеными активно применяются радиографические методы. Как правило, ускорители заряженных частиц и лазерная плазма используются в качестве источников рентгеновского излучения для таких исследований [1–4]. С появлением рентгеновских лазеров на свободных электронах (X-ray free electron laser – XFEL) и сверхинтенсивных оптических лазеров перед учеными открылись новые возможности для изучения материи. Например, эксперименты типа «накачка-зондирование» позволяют получить уникальные знания о свойствах вещества в экстремальных условиях [5]. Такие исследования позволяют понять поведение твердых материалов на масштабах времен движения атомов, изучить сверхбыстрые динамические явления на уровне кристаллической решетки и переходные состояния вещества [6–9].

Важной задачей для таких экспериментов является мониторинг и диагностика высокоинтенсивного пучка рентгеновского излучения. Как правило для этих целей используются рентгеновские пленки, фотодиодные детекторы, ПЗС-матрицы, фотoluminesцентные пластины [4, 10–13]. К недостаткам таких детекторов можно отнести их низкое пространственное разрешение (как правило, больше 10 мкм) и относительно малый динамический диапазон (менее 10^5). Для полей сверхинтенсивного излучения такого динамического диа-

пазон может оказаться недостаточным для разрешения интенсивности по всей области пучка.

Сравнительно новым и многообещающим регистрирующим устройством рентгеновского излучения является кристалл фторида лития (LiF). Принцип действия такого детектора основан на том, что под воздействием ионизирующего излучения, в кристаллической решетке LiF образуются локальные дефекты — так называемые «центры окраски», которые флуоресцируют в оптическом диапазоне при воздействии на них лазером определенной длины волны [14, 15]. Это позволяет разрабатывать на основе фторида лития детекторы, где изображение кодируется в соответствии с плотностью расположения центров окраски в кристалле. Среди дефектов практический интерес представляют F-центры (одиночные вакансии атома фтора, которые заполняются одним электроном), F₂ и F₃ типы (два или три F-центра, расположенных в соседних узлах кристаллической решетки). Последние два типа имеют практически полностью перекрывающиеся полосы поглощения в области 450 нм и обеспечивают интенсивную фотoluminesценцию в диапазоне видимого света [16, 17]. Для считывания изображения с поверхности кристалла после его экспозиции, как правило применяется конфокальный микроскоп, настроенный в режим флуоресценции. К преимуществам детектора LiF относятся субмикронное пространственное разрешение получаемого изображения и высокий динамический диапазон [18–20], малая цена, легкость в использовании.

Целью данной работы является *in-situ* измерение профиля сфокусированного пучка синхротронного излучения с помощью кристалла LiF для определения полного динамического диапазона такого детектора.

*E-mail: seomakarov28@gmail.com

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. Описание эксперимента

Эксперимент проводился на источнике синхротронного излучения PETRA-III (станция P04-Variable Polarization XUV Beamline, DESY, Германия) [21]. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Пучок рентгеновского излучения энергией 500 эВ и потоком $\sim 10^9$ фотонов/с от накопительного кольца проходил через коллимационные щели ($d = 100$ мкм) и микроскопическое отверстие ($r = 5$ мкм), после чего поглощался в детекторе LiF (размером 30 мм), формируя скрытое изображения профиля излучения внутри кристалла. Для накопления значимого сигнала кристалл экспонировался 1 час 40 мин.

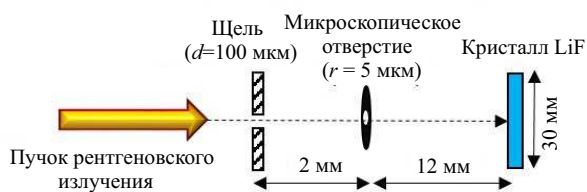


Рис. 1: Схема эксперимента

1.2. Методика получения изображения с кристалла LiF

Облученный в эксперименте кристалл был проанализирован с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа LSM700 фирмы Carl Zeiss (рис. 2,а) [22]. Принцип получения изображения с кристалла LiF схематично представлен на рис. 2,б. На первом этапе (рис. 2,б–1) происходит накопление центров окраски внутри кристалла под действием рентгеновского излучения, в результате которого образуется скрытое изображение профиля пучка. На втором этапе (рис. 2,б–2) данное изображение визуализируется посредством фотолюминесценции центров окраски (PL-сигнал). Для возбуждения и флуоресценции центров окраски мы использовали лазер накачки с длиной волны 488 нм.

Стоит заметить, что определяемый динамический диапазон кристалла LiF ограничивается динамическим диапазоном считывающей системы (для LSM700 — 16 бит). В данном микроскопе имеется возможность увеличивать контрастность и яркость изображения с помощью параметра «gain». Этот параметр соответствует величине напряжения на фотоэлектронном умножителе (ФЭУ). Таким образом при изменении gain мы могли усиливать малые сигналы и тем самым расширить динамический диапазон всей регистрирующей системы (LSM700 + кристалл LiF) до динамического диапазона кристалла LiF.



б

1. Облучение

2. Считывание

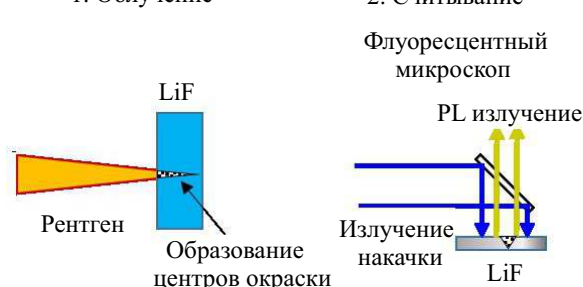


Рис. 2: а — Конфокальный лазерный сканирующий микроскоп Carl Zeiss LSM700, б — схема получения изображения с кристалла LiF

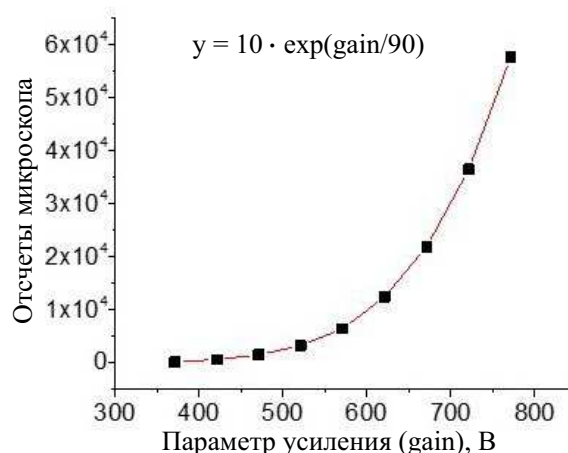


Рис. 3: Яркость изображения (в отсчетах) микроскопа LSM700 в зависимости от параметра gain

Поскольку лазерный сканирующий конфокальный микроскоп - LSM700 предназначен для биологических исследований, данные о его функциях, предоставленные производителем, были недостаточными для наших целей [23]. В частности, нам необходимо было опреде-

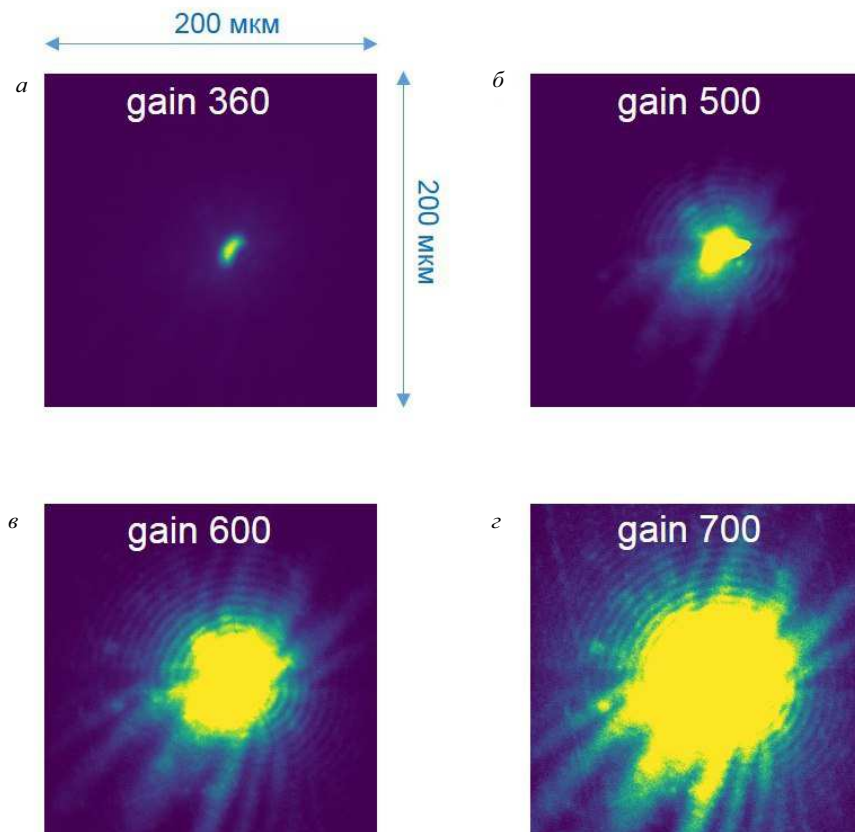


Рис. 4: Изображение фокального пятна на кристалле LiF полученное с помощью микроскопа LSM 700 (Carl Zeiss) при различных параметрах усиления: *а* — gain = 360, *б* — gain = 500, *в* — gain = 600, *з* — gain = 700

лить зависимость сигнала, отображаемого микроскопом (в отсчетах) от параметра усиления. Для этого нами производилось сканирование тестовой пластинки при разных параметрах gain. Полученная функция зависимости представлена на рис. 3. Видно, что график имеет экспоненциальный вид. Таким образом, зная параметры функции, мы имеем возможность анализировать изображения, полученные при различных параметрах gain (в диапазоне 250–750) и динамический диапазон считывающей системы может быть расширен больше 16 бит.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4, *а–з* представлено изображение сфокусированного пучка синхротронного излучения, зарегистрированное кристаллом LiF и считанное при различных параметрах усиления микроскопа gain. На данных изображениях видно, как при увеличении этого параметра возрастает видимость дифракционных колец, одновременно с этим увеличивается область, в которой сигнал достиг насыщения (желтая область). В эксперименте удалось разрешить профиль пучка в поле зрения 200 мкм (см. рис. 4, *а–з*). Как уже упоминалось выше, одним из преимуществ детектора LiF является

его большое поле зрения, ограниченное только размером изготовленного кристалла. На рис. 4, *з* отчетливо видны дифракционные кольца от круглого отверстия (рис. 1) с характерным размером менее 3 мкм, что не является пределом разрешающей способности детектора LiF. Теоретически, данное значение сравнимо с размером центров окраски — порядка нм, однако на практике, пространственное разрешение кристалла ограничено размером облака вторичных электронов, физика образования которого описана в работе [18].

Рассмотрим теперь динамический диапазон кристалла LiF, с которым был зарегистрирован пучок рентгеновского излучения в эксперименте. Данная величина определяется как:

$$D = \frac{I_{max}}{I_{min}}, \quad (1)$$

где D — динамический диапазон детектора, I_{max} и I_{min} — величины максимального и минимального сигнала соответственно.

Так для измерения полного динамического диапазона кристалла LiF необходимо знать значение сигнала в центре пучка и в последнем видимом дифракционном кольце (рис. 4). Для этого необходимо построить профиль сфокусированного рентгеновского излучения

в полном поле зрения и совместить изображения, полученные при различных параметрах gain.

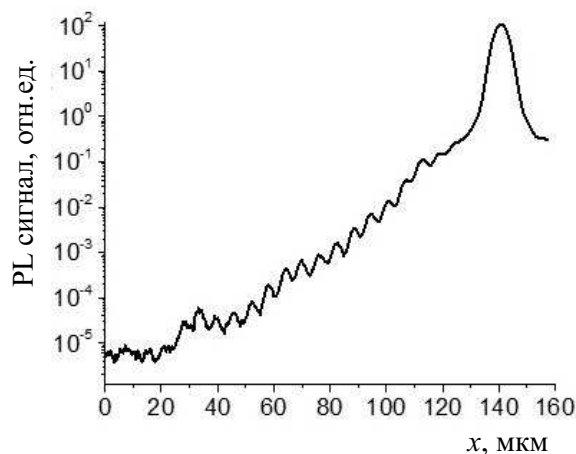


Рис. 5: Профиль пространственного распределения пучка рентгеновского излучения, зарегистрированного кристаллом LiF, представленный в логарифмической шкале (рис. 4)

Используя ранее полученную функцию в разделе 1.2. для зависимости яркости изображения от параметра gain, был восстановлен полный профиль пучка (рис. 5). Из профиля видно, что нам удалось разрешить до 15 дифракционных колец. Значение сигнала в центре пучка $\sim 10^2$ отн.ед., в то время как минимальный сигнал в последнем кольце равен $\sim 10^{-4}$ отн.ед., так мы можем заключить, что динамический диапазон кристалла LiF порядка 10^6 .

Стоит отметить, что зарегистрированный профиль рентгеновского излучения на рис.4,а отличается от ожидаемого распределения за круглым отверстием. Данный факт указывает на то, что при таком длительном экспонировании пучок был не стабилен. Так использование кристалла LiF для диагностики пучков позволяет регистрировать рентгеновское излуче-

ния с высоким динамическим диапазоном, субмикронным пространственным разрешением и одновременно с большим полем зрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Флуоресцентный детектор, кристалл фторида лития, может использоваться как альтернативный детектор при диагностике сверхинтенсивных пучков рентгеновского излучения. Отличительной чертой данного детектора является его высокий динамический диапазон и сверхвысокое пространственное разрешение. В частности, в данной работе продемонстрировано измерение профиля пучка синхротронного излучения при использовании кристалла LiF на установке PETRA III с динамическим диапазоном $\sim 10^6$, с большим полем зрения (200 мкм) и микронным пространственным разрешением. Благодаря своим характеристикам флуоресцентный детектор кристалл фторида лития может быть полезен в экспериментах по радиографии с использованием сверхинтенсивных рентгеновских полей.

Благодарности

Автор выражает благодарность группе И. Вартанянца, а именно М. Rose, T. Senkbeil, Andreas von Gundlach, S. Stuhr, Ch. Rumancev, D. Dzhigaev, P. Skopintsev, S. Lazarev, I. Zaluzhnyy, J. Viehhaus, A. Rosenhahn за помощь в проведении эксперимента на синхротронном источнике PETRA III (Гамбург, Германия).

Работа выполнена в ОИВТ РАН в рамках государственного задания ФАНО России (тема 01201357846). Макаров С.С. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

- [1] Johansson G. A., Holmberg A., Hertz H. M., Berglund M. Rev. Sci. Instrum, 2002. **73**. P. 1193.
- [2] Kaiser J. et al. Eur. Phys. J. D. 2005. **32**. P. 113.
- [3] Chapman H. N. et al. Nature. 2011. **470**. P. 73.
- [4] Rose M. et. al. Synchrotron Rad. 2015. **22**. P. 819.
- [5] David C., Karvinen P., Sikorski M., Vartiainen I., Song S., Milne C. J., Mozzanica A., Kayser Y., Diaz A., Mohacsi I. et al. Scientific Reports. 2014. **5**. P. 7644.
- [6] Young L. et al. Nature. 2010. **466**. P. 56.
- [7] Vinko S. M. et al. Nature. 2012. **482**. P. 59.
- [8] Rohringer N. et al. Nature. 2012. **481**. P. 488.
- [9] Boestedt C. et al. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2013. **46**. 164003.
- [10] Chang C., Naulleau P., Anderson E., Attwood D. Opt. Commun. 2002. **182**. P. 25.
- [11] Paterson D. et al. Opt. Commun. 2001. **195**. P. 79.
- [12] Andersson A. et al. Epac 96: Proceedings of the Fifth European Particle Accelerator Conference, 1996. P. 1689.
- [13] Di Lillo F. et al. Journal of Instrumentation. 2015. **10**. Issue 05.
- [14] Bonfigli F., Flora F., Franzini I., Nichelatti E., Montereali R. M. Journal of Luminescence, 2009. **129**. P. 1964.
- [15] Baldacchini G. et al. Review of scientific instruments, 2005. **76**. 113104.
- [16] Bonfigli F., Gaudio P., Lupelli I., Nichelatti E., Richetta M., Vincenti M. A., Montereali R. M. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2010. **15**.
- [17] Samad R. E., Courrol L. C., Gomes L., Ranieri I. M., Baldochi S. L., de Freitas A. Z., Vieira N. D. Journal of Physics: Conference Series. 2010. **249**.
- [18] Pikuz T. A. et al. Scientific Reports. 2015. 5:17713
- [19] Baldacchini G. et al. Proceedings of SPIE. 2003. **5131**.
- [20] Blejchar T. et al. Proceedings of SPIE. 2015. **9511**.

[21] http://photon-science.desy.de/facilities/petra_iii/beamlines/index_eng.html

pathways.html

[22] <https://www.zeiss.com/microscopy/us/solutions/reference/all-tutorials/spectral-imaging/lsm700-light->

[23] https://www.mikroskop.com.pl/pdf/LSM700_1.pdf

***In-situ* profile measurement of a focused synchrotron radiation beam by a fluorescence detector with a dynamic range of 10^6**

S. S. Makarov^{1,2,a}, S. A. Pikuz², A. P. Chernyaev¹

¹*Department of Physics of Accelerators and Radiation Medicine Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow, 119991, Russia*

²*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS) Moscow, 125412, Russia
E-mail: ^aseomakarov28@gmail*

The use of fluorescent detectors is considered extremely promising for the registration of super-intensive X-ray beams. This is due to a number of advantages of such detectors in comparison with traditional detectors (such as CCD, diodes, X-ray films, etc.). In particular, this type of detectors has submicron spatial resolution, simultaneously with a large field of view (up to several cm²). It is also known that the dynamic range of a fluorescent detector (lithium fluoride crystal — LiF) for soft X-ray radiation significantly exceeds the dynamic range of conventional detectors 10^4 . In the framework of this work, the possibility of in-situ profile measurement of a focused synchrotron radiation with ultra-wide dynamic range 10^6 using a fluorescent detector (lithium fluoride crystal—LiF) and a confocal laser scanning microscope are presented.

PACS: 42.79.Pw

Keywords: synchrotron radiation, lithium fluoride crystal LiF, color centers, dynamic range, confocal laser scanning microscope.
Received 23 October 2018.

Сведения об авторах

1. Макаров Сергей Станиславович — аспирант; e-mail: seomakarov28@gmail.com.
 2. Пикуз Сергей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, зав.лаб.; e-mail: spikuz@gmail.com.
 3. Черняев Александр Петрович — доктор физ.-мат. наук; зав. каф.; e-mail: A.P.Chernyaev@yandex.ru.
-