

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПЛАЗМЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С СУБМИКРОНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Т. А. Пикуз^{1,2}, П. Мэйби³, Б. Альбертацци³, Т. Мишель³, Г. Ригон³, С. А. Пикуз^{2,9}, С. С. Макаров^{2,9}, Н. Озаки^{5,6}, Т. Мацуока¹, К. Катагири⁵, К. Мияниши⁶, К. Такахаши⁵, К. Танака^{5,10}, Ю. Инубуши⁷, Т. Тогаши⁷, Т. Ябуручи⁸, М. Ябаши^{7,8}, А. Каснер⁴, Р. Кодама^{1,5,6}, М. Кениг^{3,5}

¹ Институт открытых и междисциплинарных исследований, университет Осаки, Япония

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

³ Политехническая школа-университет Пьера и Мари Кюри, лаборатория высокоинтенсивных лазеров, Франция

⁴ Университет Бордо, центр применения интенсивных лазеров, Франция

⁵ Высшая инженерная школа, университет Осаки, Япония

⁶ Институт лазерной техники, университет Осаки, Япония

⁷ Японский Научно-исследовательский институт синхротронного излучения Сайо, Япония

⁸ Исследовательский центр РИКЕН, Сайо, Япония

⁹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

¹⁰ Международный центр ELI-NP, Мэгуреле, Румыния

Рентгеновская радиография является фундаментальной диагностикой в физике высокой плотности энергии (HEDP) и используется в широком спектре областей физики, включая лабораторную астрофизику и исследования инерциального управляемого термоядерного синтеза. Данный метод позволяет исследовать временную эволюцию быстро меняющихся явлений, таких как ударное сжатие вещества, взрывные волны или гидродинамические неустойчивости, сверхбыстрые процессы, протекающие в плазме, которые часто непрозрачны для видимого света. С появлением рентгеновских лазеров на свободных электронах и сверхинтенсивных оптических лазеров перед учеными открылись новые возможности для экспериментальных исследований HEDP, что требует как высокого пространственного, так и временного разрешения методов рентгеновской радиографии, чтобы исследовать экстремальные состояния материи. Во всех этих случаях точность измерений ограничена пространственным разрешением и динамическим диапазоном рентгеновских детекторов изображающего метода.

Сложностью использования стандартных детекторов (ПЗС-матрицы, радиохромные пленки, фотодиоды и др.) в таких экспериментах является недостаточный динамический диапазон и пространственное разрешение в поле сверхинтенсивного излучения. Сравнительно новым и многообещающим детектором является кристалл фторида лития (LiF). Принцип действия флуоресцентных кристаллических детекторов основан на том, что при воздействии ионизирующего излучения, в кристаллической решетке образуются дефекты – так называемые «центры окраски». При воздействии на облученный кристалл лазером определенной длины волны эти центры высвечивают в видимом диапазоне длин волн. К преимуществам детектора LiF относятся уникально широкий динамический диапазон и субмикронное пространственное разрешение, при одновременно большом поле зрения (до нескольких см²).

В данной работе демонстрируются возможности использования флуоресцентных кристаллических детекторов для целей рентгеновской визуализации как с использованием лазерно-плазменного рентгеновского источника, так и полностью когерентного излучения рентгеновского лазера на свободных электронах.

Схема мишени

Мишени, используемые в данной работе, состояли из слоя бромированного пластика, прикрепленного к тонкой (~ 1 мкм) золотой фольге, используемой в качестве радиационного экрана, пластикового аблятора и тонкой цилиндрической ударной трубки, заполненной пенопластом низкой плотности. Рябь с синусоидальным профилем предварительно накладывалась на всю поверхность бромированного пластикового слоя. Эскиз мишени показан на рис. 1.

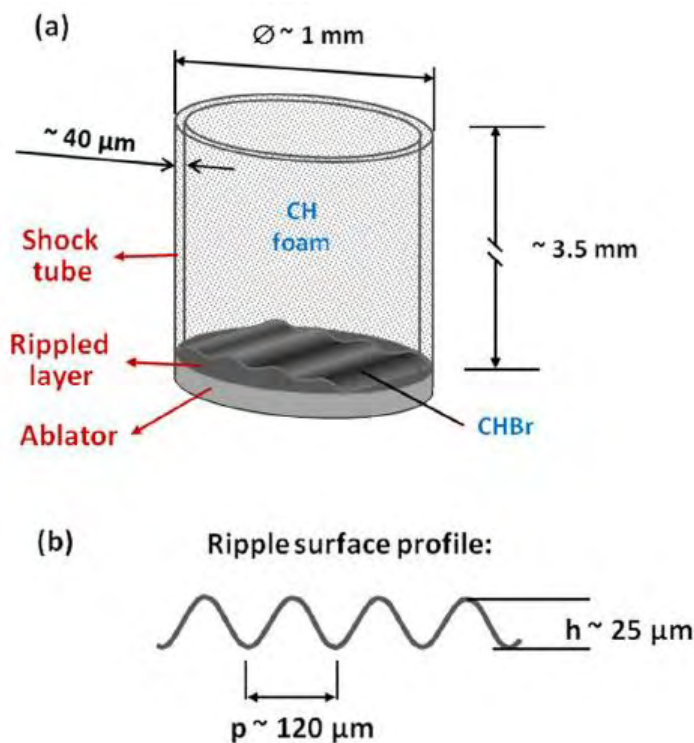


Рис. 1. Схема статичной НРТ мишени, используемой для проверки платформы рентгенографии – а. Показаны состав материала и размеры мишени; б – параметры предварительно наложенной ряби на поверхности

Радиография с лазерно-индуцированным источником рентгеновского излучения

Эксперимент проводился на установке LULI2000 (Франция). Источник рентгеновской подсветки был создан взаимодействием лазерного импульса PICO2000 (80 Дж, 10 пс) с наконечником платиновой проволоки диаметром 25 мкм. Оцененный выход рентгеновского излучения для этих параметров лазера в спектральном диапазоне 4,5–4,8 кэВ (K_{α} – 4,51 кэВ и He_{α} – 4,75 кэВ) составлял порядка 10^{11} фотонов в угле 4π . Мишень с подсветкой располагалась на расстоянии $D = 40$ мм от объекта, подлежащего рентгенографии. Три золотые сетки с 300, 600 и 1000 линиями на дюйм (lpi) были использованы для измерения разрешения платформы, а также реальных мишеней, обычно используемых в экспериментах по изучению неустойчивости Рэлея – Тейлора (НРТ). Детектор LiF (диаметр 20 мм и толщина 2 мм) размещался на расстоянии $P = 10$ мм от объекта.

Мы сравнили рентгеновское изображение НРТ мишени, полученное на кристалле LiF и на изображающей пластине (IP) (см. рис. 2). Из профилей интенсивности на рис. 2, б, с видно, что границы неоднородностей мишени разрешены значительно лучше с LiF по сравнению с IP: 7,5 мкм и 30 мкм соответственно. Однако следует отметить, что IP показывает более контрастное изображение из-за разницы в отклике двух детекторов в спектральном диапазоне 4–5 кэВ.

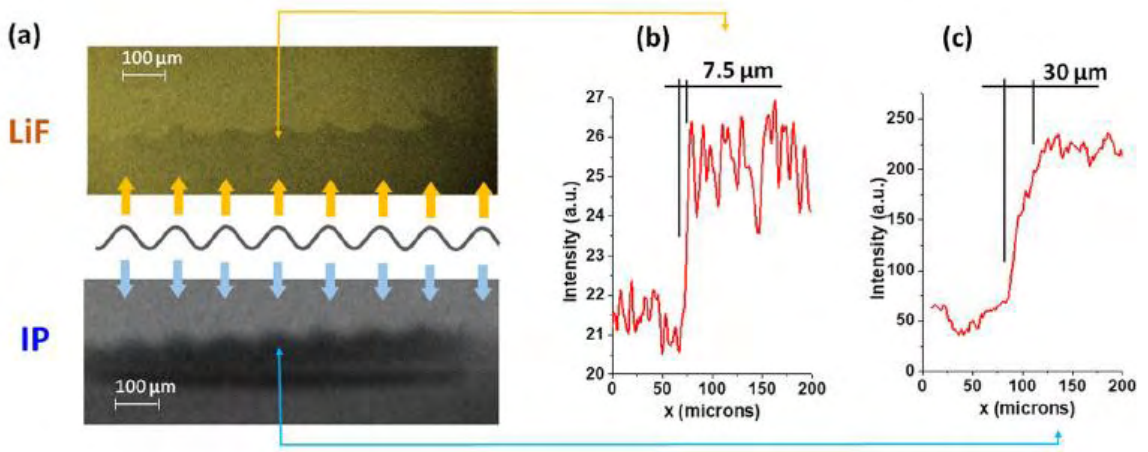


Рис. 2. Сравнение изображений НРТ мишени, полученных с помощью детекторов LiF и IP – а; интенсивность профиля вдоль тонких стрелок в изображениях LiF и IP – (б) и (с) соответственно

Радиография с использованием рентгеновского лазера на свободных электронах

Эксперимент проводился на установке SACLA (Япония). Пучок рентгеновского лазера на свободных электронах имел энергию фотонов 10 кэВ, энергию импульса на выходе из ондулятора ~490 мкДж/импульс, расходимость 2,4 мкрад и размер пятна в плоскости мишени ~1 мм. Используемые кристаллы LiF имели диаметр 20 мм и толщину 2 мм. Фотолюминесцентные изображения, записанные на LiF, наблюдались при сканировании конфокальным флуоресцентным микроскопом Nikon C2 с длиной волны лазерного возбуждения 445 нм и увеличением 4X, 10X и 40X.

Моделирование абсорбционных и фазово-контрастных изображений осуществлялось с использованием программной среды для когерентного и частично когерентного рентгеновского излучения, WavePropaGator (WPG) [2]. Этот программный пакет является развитием предыдущих методов расчета и является наиболее актуальным для приложений ЛСЭ, а также находится в открытом доступе [3].

Результаты сравнения смоделированного и экспериментального изображений мишени, показаны на рис. 3. В обоих случаях наблюдается усиление фазового контраста.

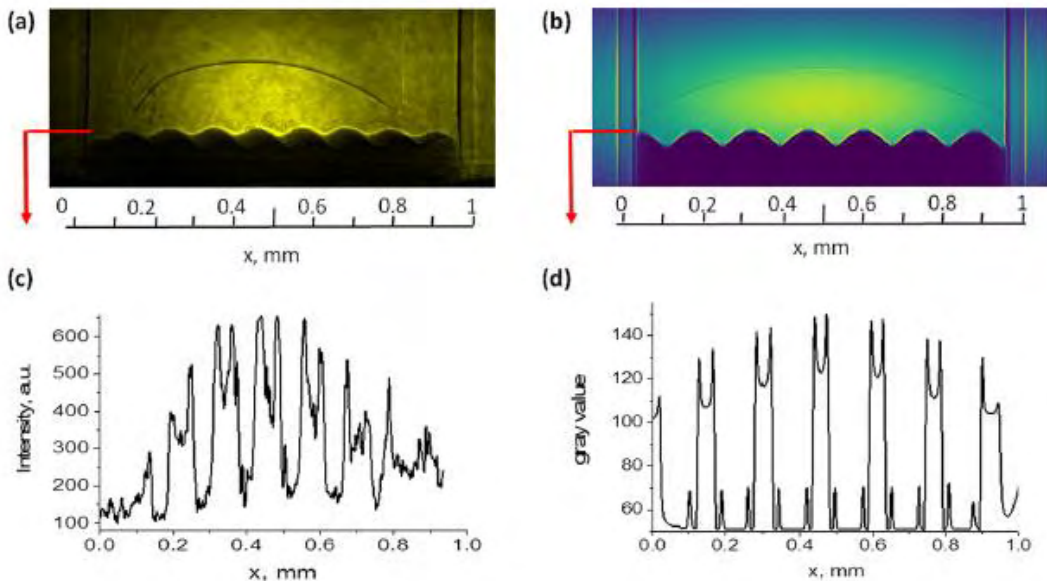


Рис. 3. Сравнение экспериментального изображения статичной НРТ мишени (а), полученного на кристалле LiF, с моделированием (б)

Список литературы

1. Faenov A. Y. et al. Advanced high resolution x-ray diagnostic for HEDP experiments // Scientific Reports, 2018. 8:16407.
2. Samoylova L. et al. WavePropaGator: interactive framework for X-ray free-electron laser optics design and simulations // J. Appl. Cryst., 2016. 49, 1347.
3. Chubar O. et al. Time-dependent FEL wavefront propagation calculations: Fourier optics approach // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., 2008. A 593, 30.