

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ ОТРАЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИ ИЗОГНУТОГО КРИСТАЛЛА СЛЮДЫ, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

М. А. Алхимова^{1,2}, С. А. Пикуз^{1,2}, И. Ю. Скоблев^{1,2}, А. Я. Фаенов^{2,3}

Предлагается способ определения кривой отражения кристаллов, основанный на использовании широкополосного источника рентгеновского излучения и дополнительного спектрометра с заранее измеренными характеристиками. Такая методика хотя и не позволяет получить абсолютные значения коэффициента отражения, но дает возможность измерить зависимость его относительных значений от длины волны. С помощью рентгеновского излучения релятивистской плотной лазерной плазмы измерена кривая отражения сферически изогнутого кристалла слюды в диапазоне 6.7–8.7 Å. Полученная кривая отражения использована для корректной интерпретации спектров рентгеновского излучения плотной плазмы, образуемой при взаимодействии петаватт-ного лазерного импульса с твердыми мишенями.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, кристаллический спектрометр, лазерная плазма.

Знание отражательных свойств кристаллов [1–3] в рентгеновском диапазоне длин волн необходимо при решении самых разнообразных задач рентгеновской спектроскопии (см., напр., [4, 5]). В полной мере это касается сферически изогнутых кристаллов, находящихся самое широкое применение в силу присущих им как фокусирующих, так и дисперсионных свойств. Довольно часто такие кристаллы используются для диагностики и получения спектральных изображений высокоэнергичной плотной плазмы [6–12].

¹ НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: MAALkhimova@mephi.ru.

² ИВТАН, 125412 Россия, Москва, ул. Ижорская, 13; e-mail: anatologyf@hotmail.com.

³ Институт академических инициатив, Университет Осаки, Япония.

При этом, поскольку способность сферически изогнутого кристалла отражать рентгеновское излучение определяет характеристики измеренных в эксперименте спектров, то она должна быть известна для последующей корректной интерпретации полученных данных.

Эффективность отражения рентгеновского излучения (РИ) кристаллом зависит от его структурных параметров и качества обработки. Довольно часто в диагностике РИ применяются кристаллы альфа-кварца, поскольку они имеют идеальную монокристаллическую структуру и их отражательные свойства хорошо изучены. Кроме того, технология создания SiO_2 кристаллов не связана с механической и термической обработкой, приводящей к возникновению дефектов и деформаций в кристаллической решетке. Наравне с кварцем для рентгеноспектральной диагностики и формирования спектральных изображений используются кристаллы RAP, KAP и слюда, однако их отражательные свойства в рентгеновском диапазоне излучения изучены далеко не полностью, а технология производства более сложна. При измерении их отражательных свойств надо учитывать, что они не являются монокристаллами, а представляют собой сложные поликристаллические структуры и спектральная зависимость кривых отражения в этих случаях должна измеряться фактически для каждого образца.

Для измерения кривой отражения кристалла (далее для краткости будем называть этот процесс калибровкой кристалла) обычно использовали монохроматические источники РИ с перестраиваемым спектральным диапазоном. Например, в качестве таких источников применяют рентгеновские трубки и синхротронное излучение. Однако в случае, когда речь идет о мягком рентгеновском диапазоне длин волн, представляющем особый интерес для диагностики высокотемпературной плазмы, доступность таких источников весьма ограничена. Поэтому на практике чаще всего применяются теоретические кривые отражения РИ, рассчитанные для различных типов кристаллов в рамках теории динамической дифракции [13].

В настоящей работе предлагается способ определения кривой отражения, основанный на использовании, с одной стороны, широкополосного источника РИ, а, с другой, дополнительного кристаллического спектрометра с заранее измеренными характеристиками используемого в нем кристалла. Такая методика хотя и не позволяет получить абсолютные значения коэффициента отражения, но дает возможность измерить зависимость его относительных значений от длины волны. Таких зависимостей достаточно для корректного определения формы спектра исследуемого излучения, и, в частности,

относительных интенсивностей различных спектральных линий, используемых для диагностики плазмы.

Рентгеновское излучение генерировалось при взаимодействии интенсивного петаваттного лазерного импульса длительностью 1 пс с мишенью из алюминиевой фольги толщиной $d = 2$ мкм. Для регистрации спектров рентгеновского излучения плазмы применялось три спектрометра (ФСР), установленных с фронтальной стороны мишени под углами $5^\circ - 10^\circ$ к нормали к поверхности мишени (рис. 1(а)). Два спектрометра были оборудованы кристаллами альфа-кварца (радиусы кривизны: $R_1 = 100$ мм и $R_2 = 150$ мм, межплоскостное расстояние $d = 4.256$ Å), настроенными для работы в первом порядке отражения. Третий спектрометр был оборудован исследуемым образцом – сферически изогнутым кристаллом слюды (радиус кривизны $R_3 = 150$ мм, межплоскостное расстояние $d = 19.9376$ Å), настроенным на работу во втором порядке отражения. Спектры регистрировались одновременно, за одну лазерную вспышку в диапазоне длин волн $6-8$ Å. В качестве детекторов рентгеновского излучения применялись фотолуминесцентные детекторы IP-Fujifilm TR и ПЗС-камера Andor. Для защиты детекторов рентгеновского излучения от засветки видимым светом использовались фильтры.

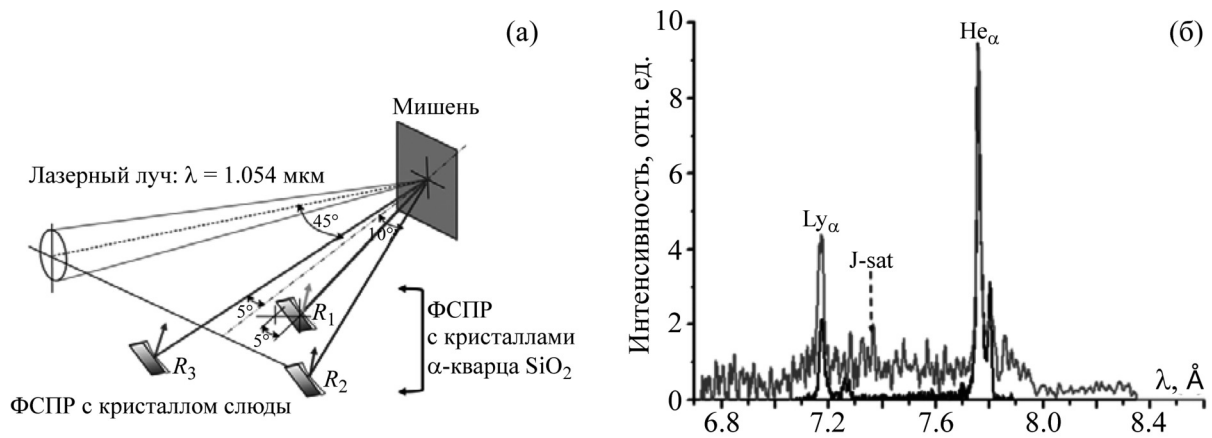


Рис. 1: (а) схема эксперимента, (б) спектры рентгеновского излучения алюминиевой лазерной плазмы, измеренные при помощи спектрометров на основе кристаллов слюды (серая кривая) и альфа-кварца (черная кривая).

Полученные в эксперименте спектры были предварительно скорректированы с учетом функций пропускания фильтров и чувствительности детектора [14]. Кривая отражения кристалла кварца, используемая для коррекции измеренных в эксперименте спектров была измерена в [15] с использованием синхротрона.

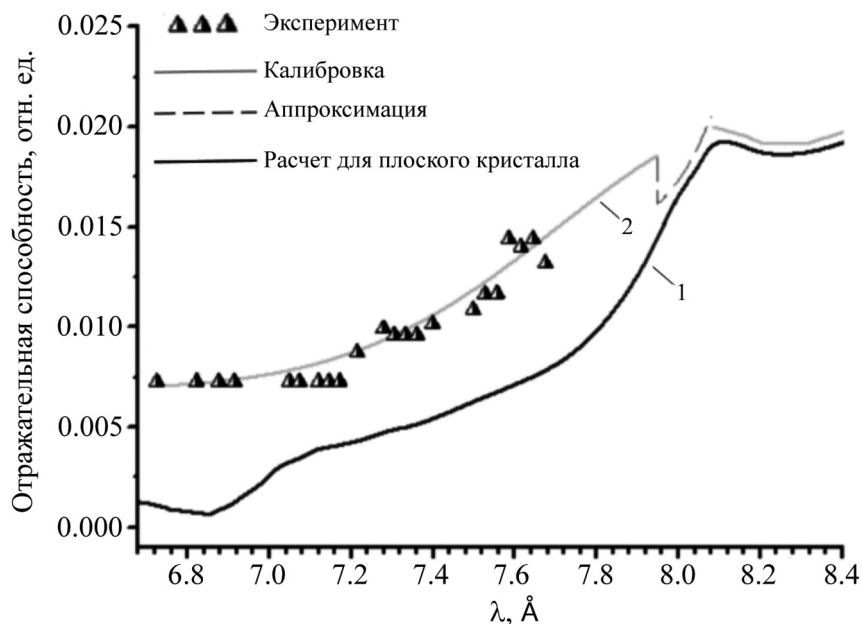


Рис. 2: Измеренная отражательная способность сферически изогнутого кристалла слюды (радиус кривизны 150 мм) во 2-ом порядке отражения. Для сравнения показан расчет [13] для плоского кристалла.

Из рис. 1(б) хорошо видно, что формы спектров, измеренных с помощью кристаллов кварца и слюды, сильно различаются. Обеспечить согласие двух спектров можно, используя для кристалла слюды кривую отражения, получающуюся простым делением спектров, наблюдаемых с помощью калиброванного и исследуемого кристаллов. Значения эффективности отражения РИ кристаллом слюды в зависимости от длины волны, полученные данным способом, представлены на рис. 2.

Поскольку вблизи К-края поглощения Al (диапазон длин волн 7.7–8.5 Å) отсутствуют экспериментальные данные, мы можем предположить только примерный характер кривой отражения, как это показано на рис. 2 пунктиром. Отметим, что различия между измеренной кривой и расчетом [13], скорее всего, связаны с неполным учетом в теоретической модели сложного химического состава кристалла слюды $(\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2)$ и изогнутости кристалла.

Необходимо подчеркнуть, что использование измеренной (кривая 2 на рис. 2) вместо расчетной (кривая 1 на рис. 2) кривых отражения оказывает огромное влияние на результат восстановления эмиссионного спектра плазмы. На рис. 3, например, показаны спектры излучения Al плазмы, один из которых (а) был восстановлен при

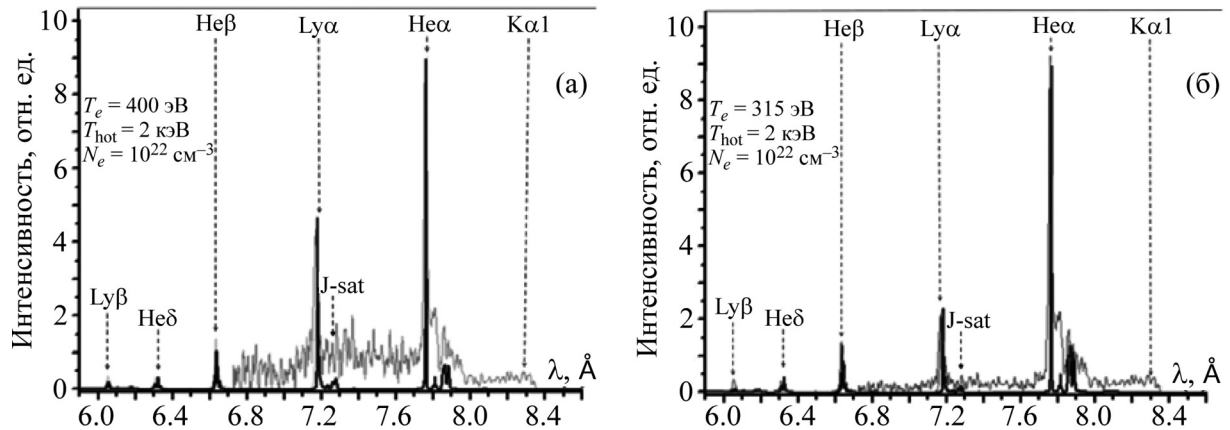


Рис. 3: Эмиссионные рентгеновские спектры Al плазмы, восстановленные с помощью измеренной (б) и расчетной (а) кривых отражения от кристалла слюды, и результаты моделирования FLYCHK [16]. Наилучшее согласие между модельными и соответствующими восстановленными спектрами было достигнуто при следующих значениях параметров плазмы: электронная температура плазмы: $T_e = 400$ эВ, электронная плотность плазмы $N_e = 10^{22}$ см $^{-3}$ (рис. 3(а)), и $T_e = 315$ эВ, $N_e = 10^{22}$ см $^{-3}$ (рис. 3(б)). При моделировании учитывалась доля горячей электронной компоненты $\sim 1\%$, при температуре $T_{\text{hot}} = 2$ кэВ.

применении расчетной кривой (2), а второй (б) – при применении измеренной кривой (1). На этом же рисунке показаны результаты моделирования спектров радиационно-столкновительным кинетическим кодом FLYCHK [16] при значениях параметров плазмы, подобранных для обеспечения наилучшего согласия измеренных и расчетных спектров. Как видно из рис. 3, использование измеренной в настоящей работе кривой отражения дает спектр, который удается гораздо лучше описать стационарной радиационно-столкновительной моделью.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: грант № 15–32–21121 и № 14–07–00863; и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. J. Haugh et al., Rev. Sci. Instr. **85**(11), 11D619 (2014).
- [2] L. Antonelli et al., Rev. Sci. Instr. **86**(7), 073507 (2015).

- [3] T. Matsushita et al., *Journal of Synchrotron Radiation* **20**(1), 80 (2013).
- [4] С. А. Пикуз и др., *Успехи физических наук* **184**(7), 759 (2014).
- [5] A. Y. Faenov et al., *Laser and Particle Beams* **33**(01), 27 (2015).
- [6] Y. S. Lavrinenko et al., *Journal of Phys. Conf. Ser.*, IOP Publishing **653**(1), 012027 (2015).
- [7] С. Н. Рязанцев и др., *Письма в ЖЭТФ* **102**(11), 817 (2015).
- [8] S. A. Pikuz et al., *High Energy Density Physics* **9**(3), 560 (2013).
- [9] S. B. Hansen et al., *Physics of Plasmas* (1994-present) **21**(3), 031213 (2014).
- [10] D. B. Sinars et al., *Rev. Sci. Instr.* **82**(6), 063113 (2011).
- [11] M. Nishiuchi et al., *Phys. Plasma* (1994-present) **22**(3), 033107 (2015).
- [12] A. Y. Faenov et al., *Sci. Rep.* **5**, 13436 (2015); doi:10.1038/srep13436.
- [13] B. L. Henke and P. A. Jaanimagi *Rev. Sci. Instr.* **56**(8), 1537 (1985).
- [14] http://henke.lbl.gov/optical_constants/
- [15] Private communication from I. Uschmann (2015).
- [16] <http://nlte.nist.gov/FLY/>

По материалам V Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 12 июля 2016 г.