_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ _____ ТЕХНИКА

УДК 53.084

ФОКУСИРОВКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ КВАНТОВ 9.5 кэВ ЭЛЛИПСОИДОМ С КРИСТАЛЛОМ НОРG

© 2021 г. Н. В. Жидков^{а,*}, Е. В. Поздняков^а, Н. А. Суслов^а

^а РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37 *e-mail: zhidkov@iskra5.vniief.ru Поступила в редакцию 27.02.2021 г. После доработки 11.04.2021 г. Принята к публикации 13.04.2021 г.

Описана постановка и результаты полномасштабных экспериментов на лазерной установке "Искра-5" (150 Дж лазерной энергии в импульсе длительностью 0.3 нс, плотность потока лазерного излучения на мишени $1.6 \cdot 10^{15}$ Bt/cm²) по фокусировке жесткого рентгеновского излучения от лазерплазменного источника с Ga-мишенью с помощью эллипсоида с кристаллом HOPG. Описана конструкция указателя, позволившая в экспериментах источник рентгеновского излучения создавать в фокусе эллипсоида с точностью не хуже 100 мкм. В полномасштабных экспериментах на расстоянии 250 мм достигнута фокусировка рентгеновского излучения в пятно диаметром 1 мм. Получено восьмидесятикратное увеличение плотности потока рентгеновского излучения с энергией квантов 9.5 кэВ.

DOI: 10.31857/S0032816221050153

введение

Бурное развитие в последние десятилетия лазеров с пико- и фемтосекундной длительностью лазерных импульсов позволило на основе лазерной плазмы создавать компактные лазер-плазменные источники импульсного рентгеновского излучения (р.и.) со столь же короткой длительностью импульсов. Такие источники, благодаря компактности и короткой длительности импульсов, оказались востребованными при проведении большого числа прикладных исследований, как, например, исследований плотной и высокотемпературной плазмы [1], фазовых переходов в материалах в экстремальных условиях [2], быстропротекающих процессов молекулярной динамики [3], а также способствовали развитию методов регистрации изображений в медицине [4, 5].

Начало исследований с использованием лазера на свободных электронах XFEL (X-ray Free-Electron Laser) ставит новую важную задачу предварительной аттестации оптических свойств и лучевой прочности элементов рентгеновской оптики, которые будут использованы для управления и формирования потоков р.и. с высокой плотностью энергии в широком спектральном диапазоне. Для сохранения короткой длительности рентгеновских импульсов XFEL и, главное, их когерентности для аттестации необходима высокая плотность потоков р.и. Воздействие таких потоков может вызывать тепловые поверхностные изменения как гладких (с шероховатостями поверхности единицы ангстрем) подложек зеркал скользящего отражения, так и монослойных Au- или Pt-покрытий толщиной ~100 нм либо многослойных интерференционных структур для рентгеновского диапазона. Кроме того, такие потоки могут вызывать объемные фазовые модификации зеркал [6, 7]. Необходимые плотности потоков р.и. могут быть достигнуты при использовании лазер-плазменных источников р.и. в сочетании с адекватными фокусирующими компонентами рентгеновской оптики.

При взаимодействии интенсивного лазерного излучения с веществом за счет таких процессов, как, например, резонансное поглощение или параметрические неустойчивости, в лазерной плазме возникают так называемые "горячие электроны", энергия которых может достигать сотен килоэлектронвольт или даже нескольких мегаэлектронвольт. Распространяясь в мишени, эти электроны вызывают тормозное р.и., а также, посредством ионизации К-оболочки вещества мишени с последующим радиационным девозбуждением, характеристическое излучение холодного либо частично ионизованного материала мишени [8-10]. Длительность этого излучения определяется главным образом продолжительностью ускорения электронов, т.е. приблизительно длительностью лазерного импульса и средним временем движения электронов внутри мишени, составляющим порядка нескольких пикосекунд [11].

Несмотря на достигнутые успехи в создании лазер-плазменных источников р.и., продолжаются исследования механизмов взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом с целью оптимизации характеристик этих источников для достижения необходимых параметров. В зависимости в основном от параметров как лазерного излучения (падающей интенсивности, коэффициента контрастности, длительности импульса, поляризации), так и мишени эффективность генерации характеристического К_α-излучения варьируется от 10⁻⁶ до 10⁻⁴ [12–15]. Однако, чтобы быть востребованными в прикладных экспериментах, созланные с помошью лазеров источники лолжны быть изотропными и использовать для фокусировки р.и. рентгеновскую оптику с большой апертурой, собирающей максимум фотонов. Фокусировка и монохроматизация р.и. могут быть достигнуты с использованием двумерно изогнутых совершенных кристаллов, таких как кварц, кремний или GaAs [16–18]. Такие кристаллы позволяют получать фокусное пятно ~50 мкм, но с эффективностью, ограниченной величиной ~10-4.

В данной работе экспериментально продемонстрирована возможность высокоэффективной фокусировки жесткого р.и. с использованием однокомпонентной рентгеновской оптики в виде эллипсоида с кристаллом HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite.)

КОНСТРУКЦИЯ

Эллипсоид с кристаллом НОРG изготовлен по технологии, описанной в работе [19], но с бо́льшими размерами полуосей: a = 126.85 мм и b == 24.5 мм, что соответствует фокусному расстоянию f = 124.5 мм. Сам эллипсоид длиной 50 мм был изготовлен симметрично относительно фокусов. В эллипсоиде на отражающей поверхности был зафиксирован кристалл НОРG толщиной 100 мкм.

В соответствии с размерами полуосей эллипсоида и удвоенным межплоскостным расстоянием кристалла HOPG (2d = 6.708 Å) энергия квантов р.и., которая отражается от поверхности эллипсоида и фокусируется в его фокусе, изменяется примерно от 9.389 кэВ на торцах эллипсоида до 9.570 кэВ в его центре.

Следует отметить, что рентгеновские трубки с такой энергией квантов отсутствуют. Подходящей энергией квантов обладает ряд компонентов линейчатого р.и. ионов галлия в лазерной плазме. Так, энергии $K_{\alpha 2}$ - и $K_{\alpha 1}$ -линий излучения, резонансной и интеркомбинационной линий гелиеподобного иона галлия составляют соответственно: 9.22482, 9.25174, 9.62781 и 9.57413 кэВ. Обычно в спектре лазерной плазмы, кроме интенсивных

 $K_{\alpha 1,2}$ и резонансной линий гелиеподобного иона, присутствуют более слабые линии ионов с меньшей степенью ионизации [20].

ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментов с эллипсоилом был изготовлен прецизионный указатель фокуса эллипсоида (далее указатель фокуса) в форме цилиндрического стакана с тонкостенным дном, на котором по оси стакана выточен ступенчатый стержень, переходящий в усеченный конус. Внутри стакана по окружности были выточены два пояска с таким диаметром, чтобы эллипсоид легко, но в то же время без люфта вставлялся в стакан. Для прохождения р.и. в дне стакана были вырезаны четыре окна и оставлены узкие, но достаточно жесткие радиальные ребра жесткости. В усеченном конусе по его оси было высверлено отверстие диаметром 1 мм, в которое вставлялась игла. Длина последней была такой, чтобы острие полностью вставленной в отверстие иглы совпадало с фокусом эллипсоида. Диаметр иглы доводился до размера, при котором она легко и без люфта вставлялась в отверстие.

Подложка мишени представляла собой стальную пластинку толщиной 0.4 мм с отверстием диаметром, немного бо́льшим 1 мм, чтобы сквозь него легко вынималась игла. Со стороны падения лазерного излучения отверстие было раззенковано до диаметра 1.5 мм. Для проведения эксперимента держатель мишени выставлялся таким образом, чтобы острие иглы находилось в плоскости тыльной поверхности держателя мишени, в центре отверстия с точностью не хуже 100 мкм. Затем, вынув иглу сквозь отверстие, на тыльную поверхность держателя приклеивалась Ga-пластинка. В экспериментах лазерное излучение фокусировалось в центр отверстия с точностью не хуже 100 мкм.

В эллипсоиде на отражающей поверхности был закреплен кристалл HOPG толщиной 100 мкм.

Исследования фокусирующих свойств эллипсоида проводились в полномасштабных экспериментах в одном из каналов лазерной установки "Искра-5" [21] по схеме, приведенной на рис. 1.

Относительные интенсивности линий р.и. зависят от плотности потока лазерного излучения в пятне облучения и от длины волны лазерного излучения. Так, при облучении мишеней более коротковолновым излучением второй гармоники количество "горячих электронов" в лазерной плазме невелико, поэтому в спектре излучения преобладают линии гелиеподобных ионов, а излучение $K_{\alpha 1,2}$ значительно слабее или почти отсутствует. Поэтому в экспериментах, чтобы получить более узкий спектр источника р.и., мишени облучались лазерным излучением второй гармоники с $\lambda =$



Рис. 1. Схема экспериментов по исследованию фокусирующих свойств эллипсоида. 1 – корпус эллипсоида; 2 – кристалл HOPG; 3 – корпус указателя фокуса; 4 – игла; 5 – подложка мишени; 6 – Gа-мишень; 7 – пучок лазерного излучения; 8 – лавсановый фильтр толщиной 200 мкм; 9 – Аl-фильтр толщиной 50 мкм; 10 – Та-диск толщиной 2 мм; 11 – корпус кассеты; 12 – прокладки различной толщины; 13 – набор рентгеновских фотопленок; 14 – лавсановый фильтр толщиной 50 мкм; 15 – танталовый фильтр толщиной 12 мкм; 16 – спектрограф линейчатого р.и. на кристалле LiF.

= 0.6575 мкм. Для получения источника р.и. небольшого размера лазерное излучение фокусировалось в пятно диаметром ~100 мкм. Энергия лазерного излучения на второй гармонике, подведенная к мишени, составляла 150 Дж, соответственно при длительности лазерного импульса 0.3 нс плотность потока лазерного излучения в пятне фокусировки достигала $1.6 \cdot 10^{15}$ Вт/см², что обеспечивало возможность генерации интенсивного сравнительно жесткого линейчатого р.и. с энергией квантов более 9.5 кэВ.

Спектр линейчатого р.и. регистрировался с помощью спектрографа на плоском абсолютно калиброванном кристалле LiF. Для получения спектральной метки на входе в спектрограф устанавливалась узкая полоска фильтра из Hf толщиной 5 мкм. В качестве спектральной метки использовался скачок поглощения на $L_{\rm III}$ Hf с энергией 9.561 кэВ [22].

Типичный спектр линейчатого р.и. Ga, зарегистрированный в одном из экспериментов, представлен на рис. 2. Согласно рисунку, в жесткой части спектрограммы хорошо видны три сравнительно яркие компоненты Не-подобного иона: резонансная $\text{He}_{\alpha}(\mathbf{R})$, интеркомбинационная $\text{He}_{\alpha}(\mathbf{I})$ и сателлитная $\text{He}_{\alpha}(\text{sat})$. В мягкой части спектра видны более слабые компоненты $K_{\alpha 1,2}$ -излучения холодного материала, а также ионов низкой степени ионизации. На спектрограмме между резонансной и интеркомбинационной линиями на полоске Hf-фильтра виден L_{III} -скачок коэффициента поглощения Hf.

Изображения сфокусированного р.и. на различных расстояниях за эллипсоидом, а также спектрограммы линейчатого р.и. в спектрографе регистрировались на рентгеновскую фотопленку Fuji с низким уровнем вуали и достаточной чувствительностью. Для минимизации ошибок при обработке результатов фильтры на указателе фокуса и на кассете с фотопленками полбирались таким образом, чтобы плотности почернений на спектрограмме и на изображении минимального пятна фокусировки были близки. Характеристическая кривая фотопленки восстанавливалась по спектрограмме, одна половина которой регистрировалась за Al-фильтром толщиной 100 мкм, а другая половина – без фильтра. Пропускание АІ-фильтра толщиной 100 мкм на наиболее интенсивной интеркомбинационной линии с энергией 9.57413 кэВ составило 0.469, что достаточно для восстановления характеристической кривой. Полученная таким образом характеристическая кривая фотопленки использовалась для прописи спектрограммы (см. рис. 2) и изображения пятна с наилучшей фокусировкой.

Изображения сечения сфокусированного р.и., зарегистрированные в одном из экспериментов на нескольких рентгеновских фотопленках, уста-



Рис. 2. Спектрограмма (а) и спектр (б) линейчатого р.и. галлия.



Смещение *z* относительно фокальной плоскости эллипсоида, мм.

Рис. 3. Изображения сечения сфокусированного р.и., зарегистрированные в одном из экспериментов на ряде рентгеновских фотопленок, установленных на различном расстоянии *z* от фокальной плоскости эллипсоида.



Рис. 4. Изображение пятна наилучшей фокусировки (а) и его пропись (б).

новленных на различном расстоянии *z* от фокальной плоскости эллипсоида, представлены на рис. 3. Изображение пятна наилучшей фокусировки и его пропись представлены на рис. 4.

Сравнение средней по пятну фокусировки плотности потока рентгеновского излучения в фокальной плоскости эллипсоида с получаемой при обработке спектрограммы плотностью потока непосредственно от лазерной плазмы проводилось по экспериментальной характеристической кривой используемой фотопленки. При этом учитывались абсолютно измеренный интегральный коэффициент отражения кристалла LiF, а также геометрия регистрации и коэффициенты пропускания всех фильтров. Получено, что использование эллипсоида позволило увеличить среднюю по пятну фокусировки плотность потока рентгеновского излучения в его фокальной плоскости, т.е. на расстоянии ~250 мм от источника излучения, практические в 80 раз, а в центре пятна – примерно еще в 1.5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана постановка полномасштабных экспериментов на лазерной установке "Искра-5" (150 Дж лазерной энергии в импульсе длительностью 0.3 нс, плотность потока лазерного излучения на мишени 1.6 · 10¹⁵ Вт/см²) по фокусировке жесткого р.и. от лазер-плазменного источника с помощью эллипсоида с кристаллом HOPG.

Разработана конструкция указателя фокуса эллипсоида, позволившая в экспериментах источник р.и. создавать в фокусе эллипсоида с точностью не хуже 100 мкм.

Проведены полномасштабные эксперименты с Ga-мишенью. На расстоянии 250 мм достигнута фокусировка р.и. в пятно диаметром 1 мм. Получено примерно восьмидесятикратное увеличение плотности потока р.и. с энергией квантов 9.5 кэВ.

Экспериментально показано, что с помощью изготовленного высокоточной токарной обработкой эллипсоида с кристаллом HOPG можно в фокусе эллипсоида достичь практически восьмидесятикратного увеличения плотности потока квантов р.и. с энергией ~10 кэВ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам ООО "Атомграф АГ", г. Москва А.А. Антонову и И.Г. Григорьевой за ценные консультации при изготовлении эллипсоида, а также всему коллективу сотрудников установки "Искра-5" за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Murnane M.M., Kapteyn H.C., Rosen M.D., Falcone R.W. // Science. 1991. V. 251. P. 531.
- Rischel C., Rousse A., Uschmann I., Albouy P.A., Geindre J.P., Audebert P., Gauthier J.C., Foerster E., Martin J.L., Antonetti A. // Nature. 1997. V. 390. P. 490. https://doi.org/10.1038/37317
- Bergsma J.P., Coladonato M.H., Edelsten P.M., Kahn J.D., Wilson K.R., Fredkin D.R. // J. Chem. Phys. 1986. V. 84. P. 6151. https://doi.org/10.1063/1.450756
- Herrlin K., Svahn G., Olsson C., Pettersson H., Tillman C., Persson A., Wahlstrom C.G., Svanberg S. // Radiology. 1993. V. 189. P. 65. https://doi.org/10.1148/radiology.189.1.8372221
- Kieffer J.C., Krol A., Jiang Z., Chamberlain C.C., Scalzetti E., Ichalalene Z. // Appl. Phys. B: Lasers Opt. 2002. V. 74. P. 75.
 - https://doi.org/10.1007/s00340-002-0870-3
- Kiryukhin V., Casa D., Hill J.P., Keimer B., Vigliante A., Tomioka Y., Tokura Y. // Nature. 1997. V. 386. P. 813. https://doi.org/10.1038/386813a0
- Chalupský J., Hájková V., Altapova V., Burian T., Gleeson A.J., Juha L., Jurek M., Sinn H., Störmer M., Sobierajski R., Tiedtke K., Toleikis S., Tschentscher Th., Vyšín L., Wabnitz H., Gaudin J. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 031111. https://doi.org/10.1063/1.3184785
- Kruer L. The Physics of Laser Plasma Interactions. Frontiers in Physics Lecture Note. Series 15679. Addison-Wesley, Reading, 1988.
- Rousse A., Audebert P., Geindre J.P., Falliès F., Gauthier J.C. // Phys. Rev. E. 1994. V. 50. P. 2200. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.50.2220
- Schnürer M., Nickles P.V., Kalashnikov M.P., Sandner W., Nolte R., Ambrosi P., Miquel J.L., Dulieu A., Jolas A. // Phys. Plasmas. 1995. V. 2. P. 3106. https://doi.org/1063/1.871142

- Reich C., Gibbon P., Uschmann I., Förster E. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 4846. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4846
- Yu J., Jiang Z., Kieffer J.C., Krol A. // Phys. Plasmas. 1999. V. 6. P. 1318. https://doi.org/10.1063/1.873372
- Ede D.C., Pretzler G., Fill E., Eidmann K., Saemann A. // Appl. Phys. B: Lasers Opt. 2000. V. 70. P. 211. https://doi.org/10.1007/s003400050034
- King J.A., Akli K., Snavely R.A., Zhang. B., Key M.H., Chen C.D., Chen M., Hatchett S.P., Koch J.A., MacKinnon A.J., Patel P.K., Phillips T.R., Town P.J., Freeman R.R. // Rev. Sci. Instrum. 2005. V. 76. P. 076102. https://doi.org/10.1007/s003400050034
- Park H.S., Chambers D.M., Chung H.K., Clarke R.J., Eagleton R., Giraldez E., Goldsack T., Heathcote R., Izumi N., Key M.H., King J.A., Koch J.A., Landen O.L., Nikroo A., Patel P.K. et al. // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 056309. https://doi.org/10.1063./1.2178775
- Berreman D.W., Stamatoff J., Kennedy S.J. // Appl. Opt. 1977. V. 16. P. 2081. https://doi.org/10.1364/AO.16.002081
- 17. *Förster E., Gäbel K., Uschmann I. //* Laser Part. Beams. 1991. V. 9. P. 135.
- Missalla T., Uschmann I., Förster E., Jenke G., von der Linde D. // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70. P. 1288. https://doi.org/10.1063/1.1149587
- Uschmann I., Nothelle U., Förster E., Arkadiev V., Langhoff N., Antonov A., Grigorieva I., Steinkopf R., Gebhardt A. // Appl. Opt. 2005. V. 44. P. 5069. https://doi.org/10.1364/AO.44.005069
- Ватулин В.В., Винокуров О.А., Волкова К.А., Гаранин Р.В., Гаспарян П.Д., Елисеев Г.М., Жидков Н.В., Коваленко В.П., Кузнецов П.Г., Куликов М.А., Марцовенко Д.И., Моренко Л.З., Плетенева Н.П., Рябикина Н.А., Смирнов В.В. и др. // ВАНТ. Серия Теоретическая и прикладная физика. 2014. Вып. 3. С. 3.
- Анненков В.И., Беспалов В.И., Бредихин В.И., Виноградский Л.М., Гайдаш В.А., Галахов И.В., Гаранин С.Г., Ершов В.П., Жидков Н.В., Зильберберг В.В., Зубков А.В., Калипанов С.В., Каргин В.А., Кириллов Г.А., Коваленко В.П. и др. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 11. С. 993.
- 22. *Henke B.L., Gullicson E.M., Davis J.C.* // Atomic Data and Nuclear Data tables. 1993. V. 54. P. 181.