

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ КОГЕРЕНТНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ: ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

С. С. Макаров

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Рентгеновская радиография является ключевой изображающей диагностикой в широком классе лазерно-плазменных экспериментов по физике высокой плотности энергии (ФВПЭ), включая лабораторную астрофизику и исследования инерционного термоядерного синтеза. Она позволяет получать двумерное распределение плотности по всему объему объекта и изучать временную эволюцию быстроразвивающихся гидродинамических явлений, таких как лазерно-индуцированные ударные волны или плазменные струи, взрывные волны или гидродинамические неустойчивости, которые часто непрозрачны для видимого света.

Самым простым и широко используемым зондирующим излучением является рентгеновский источник на основе лазерной плазмы. Типичное разрешение, достигаемое сегодня, составляет порядка 10–20 мкм по пространству и порядка пикосекунды во времени. Поскольку видимость зарегистрированной рентгенографической картины сильно зависит от яркости, монохроматичности и когерентности источника излучения, изображения от лазерно-плазменных источников зачастую размыты.

Новые возможности, даже новая эра для рентгеновской радиографии в экспериментах по ФВПЭ открылась с появлением лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). В 2009 году на установке FLASH был сделан первый шаг к реализации фазово-контрастной радиографии (ФКР) в мягком рентгеновском спектральном диапазоне при энергии фотонов 155 эВ [1]. Однако реальный прогресс в развитии рентгенографических подходов связан с жесткими рентгеновскими ЛСЭ (РЛСЭ, англ. XFEL). Такие источники создают уникальную возможность для решающих достижений в изучении малоконтрастных гидродинамических явлений в лазерной плазме путем реализации подхода когерентной фазово-контрастной радиографии сверхвысокого разрешения. Во-первых, фемтосекундная длительность зондирующих импульсов РЛСЭ обеспечивает высокое временное разрешение, намного превышающее обычный наносекундный временной масштаб гидродинамики плазмы. Кроме того, чрезвычайно высокое спектральное разрешение, когерентность и экстремальная яркость источника позволяют получать высококонтрастные изображения объектов с низкими градиентами плотности с использованием подхода фазово-контрастной рентгенографии.

В настоящее время существуют три РЛСЭ (LCLS – США, SACLA – Япония, EuXFEL – Германия), на которых работают станции, посвященные исследованиям по ФВПЭ. На каждой станции имеется возможность одновременно доставлять рентгеновский импульс ЛСЭ и оптические импульсы наносекундной и фемтосекундной длительности в экспериментальную камеру. Сочетание пучка РЛСЭ (с зондирующими фотонами в несколько кэВ) с мощными оптическими лазерами в лабораторном эксперименте открывает уникальные возможности для решения задач по лабораторной астрофизике, физике конденсированных сред, лазерном термоядерном синтезе и многих других областях.

В рамках доклада подробно обсуждаются возможности и ограничения когерентной фазово-контрастной радиографии с импульсом РЛСЭ для изучения малоконтрастных гидродинамических явлений в лабораторных экспериментах с лазерной плазмой [2, 3]. Представлен обзор последних ярких исследований лазерно-индуцированных неустойчивостей Рэля-Тейлора и упругопластических ударных волн в наносекундной лазерной плазме [4–6]. Это особенно актуально в контексте строительства в Российской Федерации установки класса «мегасайенс» «СИЛА» (синхротрон и лазер), включающей ускорительно-накопительный комплекс с синхротронным источником 4-го поколения и РЛСЭ. Ожидаемые параметры и структура комплекса подробно описаны в недавней статье [7]. Важно отметить, что в рамках проекта разрабатывается экспериментальная станция на РЛСЭ, посвященная

изучению вещества в экстремальном состоянии (ВЭКС), генерируемого с помощью высокоинтенсивного оптического лазерного излучения нс-суб/пс длительности. Комплексные исследования лазерной плазмы, проводимые в таких экспериментах, требуют разработки соответствующих рентгеновских диагностических подходов.

Литература

1. **Rosenhahn, A.** Digital In-line Holography with femtosecond VUV radiation provided by the free-electron laser FLASH [Text] / A. Rosenhahn, F. Staier, Th. Nisius et al. // Opt. Express. – 2009. – Vol. 17. – P. 8220.
 2. **Makarov, S. S.** Possibilities of the Phase-Contrast X-Ray Method in a Laboratory Astrophysical Experiment on the Study of Plasma Instabilities [Text] / S. S. Makarov, S. A. Pikuz // Astron. Rep. – 2023. – Vol. 67. – P. 61–70.
 3. **Faenov, A. Y.** Advanced high resolution x-ray diagnostic for HEDP experiments [Text] / A. Y. Faenov, T. A. Pikuz, P. Mabey et al. // Sci Rep – 2018. – Vol. 8. – P. 16407.
 4. **Rigon, G.** Micron-scale phenomena observed in a turbulent laser-produced plasma [Text] / G. Rigon, B. Albertazzi, T. Pikuz et al. // Nat Commun – 2021. – Vol. 12. – P. 2679.
 5. **Makarov, S.** Direct imaging of shock wave splitting in diamond at Mbar pressure [Text] / S. Makarov, S. Dyachkov, T. Pikuz et al. // Matter Radiat. Extrem. – 2023. – Vol. 8. – P. 066601.
 6. **Katagiri, K.** Transonic dislocation propagation in diamond [Text] / K. Katagiri, T. Pikuz, L. Fang et al. // Science – 2023. – Vol. 382. – P. 69-72.
 7. **Kovalchuk, M. V.** Fourth-Generation Synchrotron Radiation Source with X-ray Free-Electron Laser SILA: Concept of Accelerator–Storage Complex [Text] / M. V. Kovalchuk, A. E. Blagov, O. S. Naraikin et al. // Crystallogr. Rep. – 2022. – Vol. 67. – P. 676–683.
-