

Фокусировка рентгеновского излучения лазерно-плазменного микрофокусного источника эллиптическим концентратором

А.А. Таусенев¹, Т.А. Семенов¹, Е.О. Елифанов¹, В.В. Колдаев¹, Ю.М. Дымшиц¹,

Н.В. Минаев¹, Е.И. Мареев¹, А.М. Тихонов², В.Е. Асадчиков¹

¹ Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский Институт», 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д.1

² Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, 119334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д.2, стр. 1

Продemonстрирована фокусировка излучения лазерно-плазменного рентгеновского микрофокусного источника с помощью эллиптического концентратора в пятно ~ 20 мкм (увеличение 1:2) на расстоянии 42 см. Достигнутый поток рентгеновских фотонов в фокусе концентратора составил 10^9 фот/с/см². Показано, что концентратор не искажает спектр передаваемого излучения. В работе использован лазерно-плазменный микрофокусный источник на основе медной мишени: выход $\text{Cu K}\alpha \sim 10^8$ фот/ср·с составил 30% в регистрируемом спектре 3–12 кэВ, размер источника ~ 10 мкм.

Микрорентгенофлуоресцентная спектроскопия позволяет осуществлять неразрушающий анализ элементного состава образца [1]. Фокусировку на исследуемые объект моно- или полихроматического рентгеновского излучения удобно осуществлять с помощью эллиптических концентраторов [2]. В настоящей работе мы демонстрируем возможность фокусировки рентгеновского излучения лазерно-плазменного микрофокусного источника эллиптическим концентратором

Для создания плазменного рентгеновского источника использовалось лазерное излучение иттербиевый фемтосекундной системы ANTAUS-10W-40u/250K (длина волны излучения 1030 нм, энергия в импульсе 10 мкДж, длительность импульса 280 фс, частота следования 2 МГц). Лазерное излучение фокусировалось на мишень с помощью микрообъектива ($\text{NA} = 0.2$) в пятно диаметром ≈ 4 мкм (по уровню 1/е), что позволяло достигать интенсивности 10^{14} Вт/см². Мишень представляла собой медный цилиндр, вращающийся с частотой 5000 об/мин, скорость ее вертикального перемещения составляла ≈ 3 см/мин. Интегральный выход рентгеновского излучения из плазмы регистрировался с помощью рентгеновского сцинтилляционного детектора SCSD-4 Радикон. Также в работе использовался спектрометр рентгеновского излучения X-123 (Amptek, USA). Фокусировка излучения рентгеновского микрофокусного источника осуществлялась с помощью эллиптического концентратора длиной 38 см (фокусы находятся на расстоянии 2 см от входа и выхода). Угловая юстировка концентратора на источник выполнялась с помощью лазерного трассера. Так, тонкий (диаметр 0.5 мм) пучок трассера проводился через концентратор и плазменную искру, зажигаемую на воздухе. Измерения размера рентгеновского

пятна фокусировки производилось с помощью двумерных детекторов собственной разработки.

Результаты

Воздействие фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью 10^{14} Вт/см² и частотой 2 МГц на поверхность медной мишени приводит к зажиганию горячей плазмы, излучающей жесткое рентгеновское излучение вплоть до 12 кэВ с температурой спектра около 2 кэВ. Установлено, что выход характеристического рентгеновского излучения $\text{Cu K}\alpha$ (8 кэВ) находился на уровне $\approx 10^8$ фотонов/[ср·с]. При этом доля $\text{K}\alpha$ излучения в рентгеновском спектре (3 – 12 кэВ) составила 30%. Размер микрофокусного источника (по уровню 1/2) равен примерно 10 мкм, который был измерен методом края.

Показана фокусировка рентгеновского излучения лазерно-плазменного микрофокусного источника эллиптическим концентратором в пятно ≈ 20 мкм (перенос с увеличением 1:2) на расстояние 42 см. Выявлено, что эллиптический концентратор не изменяет спектр передаваемого излучения. Обнаружено, что в фокальном пятне концентратора создается поток квантов 10^9 фот/с/см² в диапазоне 3 – 12 кэВ.

Достигнута стабильная генерация >3 часов микрофокусного источника с помощью установки локальной откачки аблированных частиц из области между объективом и мишенью, которая нивелирует негативные эффекты от их накопления. В докладе обсуждается использование созданной системы генерации и фокусировки рентгеновского излучения для картирования образцов методом рентгеновской флуоресценции.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в части оптимизации микрофокусного рентгеновского источника и по Соглашению с Минобрнауки № 075-15-2025-458 в части регистрации рентгеновских изображений.

1. Heimler, K., Gottschalk, C., & Vogt, C. (2023). Confocal micro X-ray fluorescence analysis for the non-destructive investigation of structured and inhomogeneous samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 415(21), 5083.
2. Yakimchuk, I. V., Kozhevnikov, I. V., Politov, V. Y., & Asadchikov, V. E. (2013). Ellipsoidal concentrators for laboratory X-ray sources: Analytical approach for optimization. *Crystallography Reports*, 58(2), 355-364.