

09

Тонкопленочные Al-мишени для лазерно-плазменного источника экстремального ультрафиолетового излучения

© С.А. Гарахин, А.Я. Лопатин, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, А.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603087 Нижний Новгород, Россия
e-mail: lopatin@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 4 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 4 апреля 2022 г.

Принято к публикации 4 апреля 2022 г.

При помощи зеркального спектрометра экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазона исследованы спектры излучения массивного алюминия в интервале длин волн 8.0–18.0 nm при лазерном возбуждении. Проведено тестирование тонкопленочных лазерных мишеней из алюминия и сравнительные измерения интенсивности ЭУФ излучения пленки толщиной 100 nm и мишени из массивного материала.

Ключевые слова: МР, экстремальное ультрафиолетовое излучение, тонкие пленки, лазерная плазма.

DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52783.75-22

Введение

Работы по генерации рентгеновского излучения при взаимодействии сфокусированного лазерного импульса с веществом имеют давнюю историю [1–3]. Исследовались спектральные и яркостные характеристики плазменного факела твердотельных, газовых и кластерных мишеней. Переход от газовой струи к конденсированному кластерному состоянию при сверхзвуковом истечении газа через профилированное сопло демонстрировал существенное изменение температуры плазмы и, как следствие, ее спектра излучения [4]. Представляют интерес возможности управления спектрально-яркостными характеристиками источника за счет перехода от массивной твердотельной мишени к калиброванной по толщине тонкопленочной мишени из того же материала. Вопросы о том, возможно ли существенное повышение интенсивности источника для тонких по сравнению с глубиной кратера лазерного импульса мишеней, и в какой момент начнется существенное падение сигнала при уменьшении толщины пленки, не были систематически изучены. Расширение базы экспериментальных данных по взаимодействию импульсов лазера с мишенями субмикронных толщин будет способствовать развитию математических моделей экстремального ультрафиолетового излучения лазерной плазмы, а также, вероятно, создаст предпосылки для постановки экспериментов по лазерному усилению в ЭУФ диапазоне при прохождении усиливаемого излучения в направлении „сквозь мишень“.

В настоящей работе впервые найдены подходы к изготовлению мишеней в виде металлических пленок с типичными толщинами 0.05–0.5 μm , и изготовлены образцы таких мишеней из алюминия. Выбор материала с небольшим атомным номером существенно упрощает интерпретацию спектра излучения лазерной плазмы.

Первоначальное тестирование таких мишеней выполняется с использованием имеющихся в ИФМ РАН стендов лазерно-плазменных источников, оснащенных каналами спектральной диагностики в ЭУФ диапазоне.

1. Эксперимент

На первом этапе было проведено исследование спектра излучения твердотельной мишени из массивного алюминия. Эксперименты проводились на установке [5] при возбуждении мишени Nd:YAG-лазером со следующими характеристиками: длина волны 1064 nm; энергия импульса 0.8 J; длительность импульса 5.2 ns; частота следования импульса 10 Hz; диаметр пятна фокусировки 66 μm . Спектрометрические измерения производились на спектрометре на основе многослойных рентгеновских зеркал нормального падения [6]. Кривая спектральной чувствительности прибора, определяющаяся полосой пропускания абсорбционных фильтров, спектральной зависимости коэффициента отражения рентгеновского зеркала и спектральной чувствительности детектора ЭУФ излучения представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлен спектр излучения мишени из Al в диапазоне длин волн 8.0–18.0 nm. Согласно литературным данным [7], при параметрах лазерного воздействия, сопоставимых с используемыми в нашем эксперименте, в данном диапазоне наблюдаются интенсивные группы линий в окрестности длин волн 12.5–13.1 и 16.0–16.2 nm. Группы образованы интенсивными линиями ионов Al с зарядами +4 и +3; в интервале длин волн между 13.1 и 16.0 nm присутствует относительно слабый фон тормозного и линейчатого излучения (последнее, предположительно, связано с примесными ионами). Полученные нами результаты (рис. 2) со спектральным разрешением прибора не хуже 1.0 nm не позволили

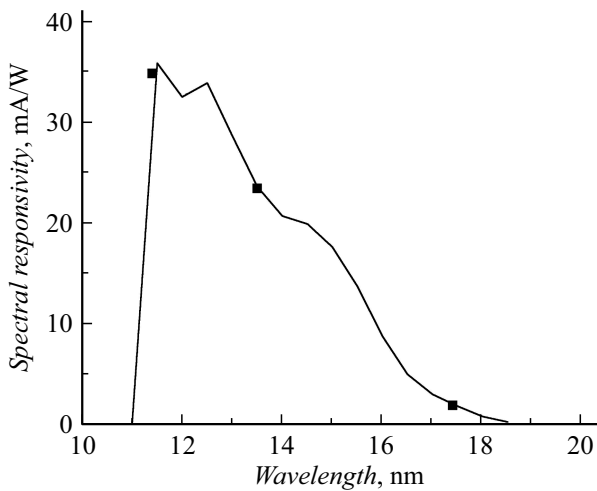


Рис. 1. Зависимость чувствительности зеркального спектрометра от длины волны (сплошная линия — расчет; точки — эксперимент).

разрешить отдельные линии, однако качественно соответствуют представленным в литературе данным.

Экспериментальные образцы тонкопленочных лазерных мишеней изготавливались по методике магнетронного напыления на подложку с предварительно сформированным на ее поверхности жертвенным слоем, растворяющимся в жидкостном травителе. Подробно методика формирования свободновисящих тонких пленок

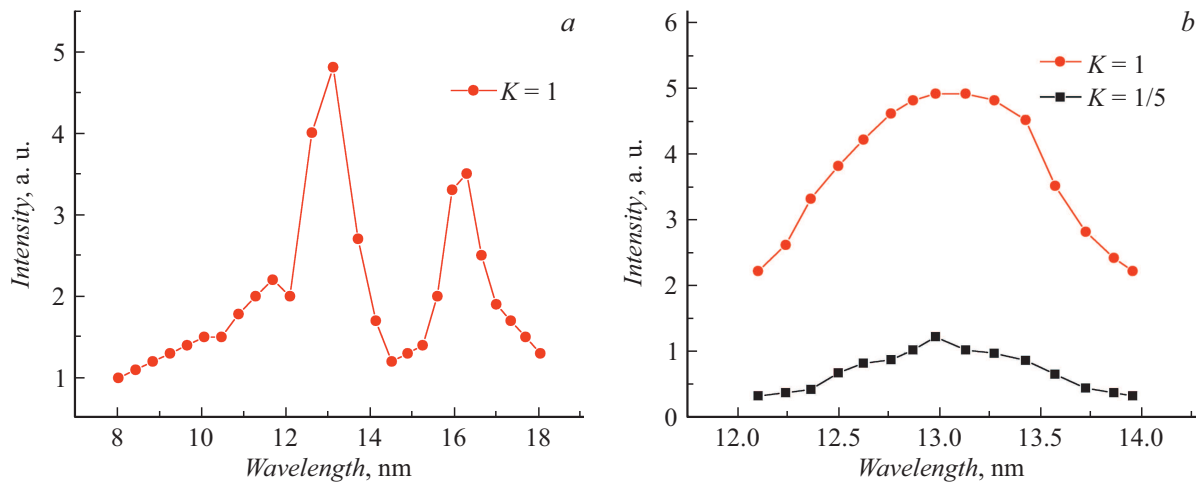


Рис. 2. Спектр излучения твердотельной Al-мишени: *a* — во всем диапазоне спектрального спектрометра (коэффициент усиления фотоприемника $K = 1$); *b* — в диапазоне длин волн 12–14 нм ($K = 1$ и $1/5$).



Рис. 3. Экспериментальный образец тонкопленочной лазерной мишени (до и после).

Сигнал от Al-мишени

Длина волны, нм	Сигнал, В	
	Пленка	Массив
13.1	3.5 ± 0.3	4.5 ± 0.3
16.2	2.1 ± 0.2	2.9 ± 0.2

с толщинами менее 500 нм описана в работе [8]. Поскольку тонкая пленка разрушается при взаимодействии с мощным лазерным импульсом, мишень изготавливалась секционированной — в виде пленки Al толщиной 100 нм, приклеенной к сетке диаметром 25 мм и размером ячейки 3×3 мм. Отдельные ячейки с Al-пленкой могли позиционироваться в область лазерной фокусировки поочередно благодаря тому, что фланец, на котором крепилась мишень, оснащался сильфонным узлом перемещения. Это позволило произвести серию выстрелов без вскрытия вакуумного объема на атмосферу для замены мишени. Фотография пленочной алюминиевой мишени толщиной 100 нм, закрепленной на держателе для установки в экспериментальную камеру, представлена на рис. 3.

В таблице приведены результаты эксперимента по регистрации сигнала от пленочной мишени толщиной 100 нм и от мишени из массивного материала.

Как можно видеть, сигнал от экстремально тонкой пленки (толщина 100 нм) лишь незначительно (не более 30%) отличается от интенсивности излучения от массивной мишени.

Заключение

Сопоставляя величины сигналов для пленочной и массивной мишеней, приведенные в таблице, можно отметить, что вклад излучения с длинами волн вблизи 13.1 nm в общее ЭУФ излучение плазмы несколько больше для мишени толщиной 100 nm, нежели для массива. Интуитивно это представляется естественным, поскольку массивный материал так или иначе должен выполнять функции „холодильника“ для плазмы и способствовать смещению ее состава в сторону уменьшения относительной доли ионов с высокими кратностями ионизации. Поэтому представляет интерес сравнение сигналов с массивной и тонкопленочной мишени и на других участках ЭУФ диапазона, но это потребовало бы переоснащения зеркального спектрометра (замены оптических элементов — многослойного зеркала, ЭУФ фильтров). В частности, линии Al пятикратной ионизации имеются в окрестности длины волны 31 nm, и эти линии уверенно наблюдались ранее для массивной мишени [7]. Представленные нами первые результаты будут дополнены сравнительными данными по выходу ЭУФ излучения из пленочных мишеней различных толщин. Изготовление по разработанной методике образцов Al-пленок с толщинами от 30–50 nm до единиц μm не представляет серьезной сложности. Основные затраты на подготовку эксперимента со статистически значимым количеством пленочных мишеней различных толщин связаны с необходимостью разработки конструкции устройства для укладки и поочередной подачи образцов в область лазерного воздействия.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1361).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.J. Nagel, C.M. Brown, M.C. Peckerar, M.L. Ginter, J.A. Robinson, T.J. McIlrath, P.K. Carroll. *Appl. Opt.*, **23** (9), 1428–1433 (1984).
- [2] A.V. Vinogradov, V.N. Shlyaptsev. *Sov. J. Quant. Electron.*, **17** (1), 1–13 (1987).
- [3] H.C. Gerritsen, H. van Brug, F. Bijkerk, M.J. van der Wiel. *J. Appl. Phys.*, **59**, 2337–2344 (1986).
- [4] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало, Н.Н. Салашенко. *ЖТФ*, **89** (11), 1656–1662 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48324.131-19 [A.N. Nechai, A.A. Perekalov, N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. *Tech. Phys.*, **64** (11), 1566–1572 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219110203]
- [5] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало, Н.Н. Салашенко, И.Г. Забродин, И.А. Каськов, А.Е. Пестов. *Поверхность*, **9**, 1–10 (2019).
- [6] А.В. Водопьянов, С.А. Гарахин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев, А.Я. Лопатин, А.Н. Нечай, А.Е. Пестов, А.А. Перекалов, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, Р.М. Смертин, Б.А. Уласевич, Н.И. Чхало. *Квант. электрон.*, **51** (8), 700–707 (2021). <http://mi.mathnet.ru/qe17892> [A.V. Vodop'yanov, S.A. Garakhin, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev, A.Ya. Lopatin, A.N. Nechai, A.E. Pestov, A.A. Perekalov, R.S. Pleshkov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, R.M. Smertin, B.A. Ulasevich, N.I. Chkhalo. *Quant. Electron.*, **51** (8), 700 (2021). DOI:org/10.1070/QEL17598]
- [7] J.M. Bridges, C.L. Cromer, T.J. McIlrath. *Appl. Opt.*, **25** (13), 2208–2214 (1986).
- [8] N.I. Chkhalo, E.B. Kluev, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, L.A. Sjmaenok, N.N. Tsybin. *Thin Solid Films*, **631**, 93–98 (2017).