

Применение разряда магнитоплазменного компрессора для моделирования оптической деградации тонкопленочных зеркальных покрытий

Д.С. Пасынкова, В.Д. Телех, А.С. Скрыбин*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**daryapasynkova1503@yandex.ru*

Аннотация. В данной работе исследуется деградация тонкопленочных зеркальных покрытий Al/MgF₂ в результате взаимодействия с высокоярким вакуумным ультрафиолетовым излучением. В качестве источника излучения использовался разряд магнитоплазменного компрессора с энерговкладом от емкостного накопителя в 3.6 кДж (параметры разряда: напряжение 20 кВ, длительность полупериода 5 мкс). Использование протяженных образцов и их расположение на различном расстоянии от оси источника позволило изменять плотность мощности излучения, приходящего на образец. Обнаружено, что при уменьшении расстояния от оси магнитоплазменного компрессора наблюдается падение отражательной способности, вплоть до полного разрушения покрытия. Кроме того, был получен «отпечаток» разряда на покрытии, позволивший определить расположение плазменного фокуса.

Ключевые слова: деградация оптических покрытий, вакуумное ультрафиолетовое излучение, магнитоплазменный компрессор.

1. Введение

Проблема взаимодействия с вакуумным ультрафиолетовым излучением (от 10 до 200 нм) заключается в том, что данный диапазон поглощается большинством материалов, включая атмосферу. Эту проблему решают различные тонкопленочные зеркальные покрытия [1, 2]. Изменяя количество, толщину, материал слоёв, есть возможность подобрать тонкопленочную структуру на конкретный диапазон, основываясь на свойствах поглощения материалов и возможности их комбинации. Тонкопленочные зеркальные покрытия широко используются в практической деятельности: освоение космоса, литография, взаимодействие материалов с вакуумным ультрафиолетовым излучением [3, 4] и т.д. Так, например, покрытие Al/MgF₂ будет использовано в зеркалах, которые будут установлены в телескопе Т-170М для детектирования длины волны 121.6 нм. Алюминий в данной паре является отражающим слоем, коэффициент отражения алюминия – около 75% в диапазоне 120-130 нм [5]. Для защиты алюминия от образования оксидной пленки используется фторид магния. Проверка устойчивости этих покрытий к фотонам высоких энергий невероятно важна для более долгосрочной работы тонкопленочной зеркальной структуры.

Магнитоплазменный компрессор является источником широкополосного высокояркого излучения. По сравнению с иными источниками вакуумного ультрафиолетового излучения магнитоплазменный компрессор – оптимальный источник с точки зрения простоты конструкции, низких экономических затрат, высокого показателя преобразования электрической энергии в энергию излучения. Его КПД в излучение составляет около 20% [6]. Именно данный источник будет использоваться для исследования тонкопленочных зеркальных покрытий. Целью данного исследования является определение изменения отражательной способности образцов в зависимости от расстояния до источника излучения.

2. Экспериментальный стенд

Для моделирования взаимодействия Al/MgF₂ с фотонами высоких энергий используется экспериментальная установка, описанная в [7, 8]. Образцами для исследования являлись 3 зеркала с покрытием Al/MgF₂ габаритами 50×15×10 мм (длина×ширина×высота). Толщина тонкопленочного покрытия – 130 нм. Ранее зеркала Al/MgF₂ после облучения в различных

газах (изменение коротковолновой границы спектра) исследовались в работах [9, 10]. Расположение образцов в данной работе относительно источника излучения показано на Рис. 1. Образец помещался в держатель. Ближний край образца располагался за 10 мм до среза магнитоплазменного компрессора. По вертикальной координате расстояние до оси источника излучения изменялось: 47, 60, 72 мм.

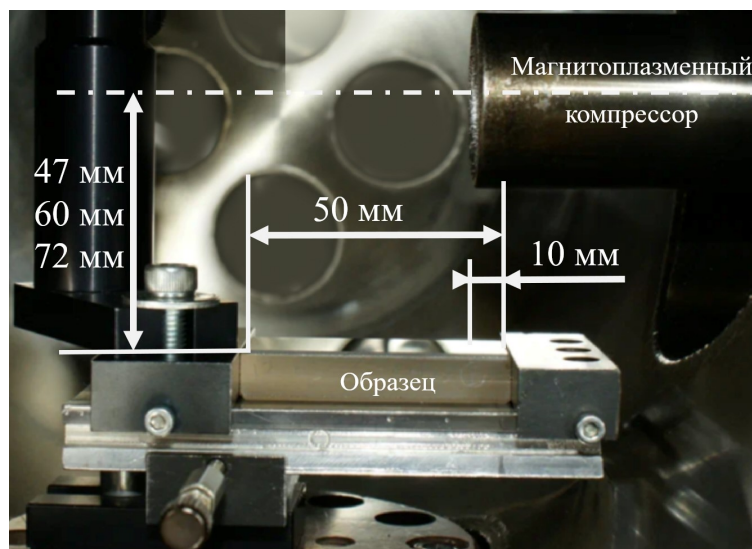


Рис. 1. Расположение образцов относительно источника излучения.

Образцы облучались в вакууме излучением магнитоплазменного компрессора эрозионного типа с коаксиальным строением электродов (6 и 26 мм – диаметр внутреннего и внешнего электродов, соответственно). Материал диэлектрической втулки между электродами – капролон. Осциллограмма тока магнитоплазменного компрессора в рамках эксперимента – затухающая синусоида, имеющая 5–6 полупериодов. Максимум тока первого полупериода – 150 кА, длительность первого полупериода – 5 мкс, напряжение разряда – 20 кВ, энерговклад в разряд – 3.6 кДж.

3. Результаты облучения

После облучения производилась диагностика тонкоплёночных зеркальных покрытий на универсальном измерительном спектрофотометре Cary 7000 (Agilent Technologies, США). У образца, расположенного на расстоянии 72 мм, отражательные характеристики после облучения изменились незначительно – максимальное относительное изменение показателя отражения составило 3.7%. У образца, наименее удалённого от источника излучения (47 мм), в зоне плазменного фокуса наблюдается полное падение коэффициента отражения, тем самым, относительное изменение составляет 100%. Наиболее интересный результат получился на образце, расположенном на расстоянии 60 мм от оси МПК. Зависимость относительного изменения показателя отражения от координаты на этом образце показана на Рис. 2.

Относительное изменение (уменьшение) показателя отражения по длине образца имеет максимум в точке с координатой 15 мм, которая соответствует минимальному расстоянию до плазменного фокуса относительно остальных экспериментальных точек. Такое поведение коэффициента отражения позволяет определить область расположения плазменного фокуса на оси разряда, которая равна 13–17 мм. Если аппроксимировать полученные экспериментальные кривые (Рис. 2) функцией Лоренца, то максимум будет находиться на координате 16.5 мм – центр плазменного фокуса.

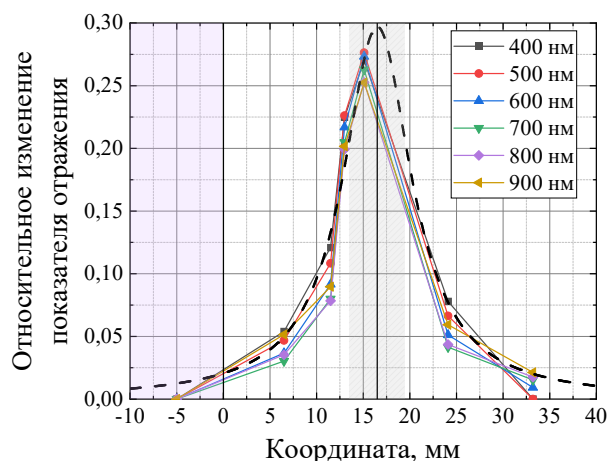


Рис. 2. Относительное изменение показателя отражения от координаты образца, расположенного на расстоянии 60 мм (пунктирная линия – теоретическая кривая).

4. Заключение

По результатам эксперимента по отражательным характеристикам образцов после облучения была определена координата расположения плазменного фокуса от границы магнитоплазменного компрессора эрозионного типа с коаксиальным строением электродов, равная 16,5 мм. Меняя расположение образцов относительно источника излучения, происходит изменение плотности мощности излучения, приходящей на образец. Максимальное изменение отражательных характеристик образцов, расположенных на расстояниях: 72 мм – 3,7%, 60 мм – 27,6%, 47 мм – 100%.

Благодарность

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSFN-2024-0007.

5. Список литературы

- [1] J.J. Larruquert, R.A.M. Keski-Kuha, Multilayer coatings with high reflectance in the EUV, *Proceedings EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy IX*, vol. **3445**, 86, 1998; doi: 10.1117/12.330330
- [2] Yu. A.Uspenskii, V.E. Levashov, and A.V. Vinogradov, High-reflectivity multilayer mirrors for a vacuum-ultraviolet interval of 35–50 nm, *Optics Letters*, vol. **23**(10), 771, 1998; doi: 10.1364/ol.23.000771
- [3] A.A. Akhsakhalyan, Yu.A. Vainer, S.A. Garakhin, et al., Set of Multilayer X-Ray Mirrors for a Double-Mirror Monochromator Operating in the Wavelength Range of 0.41–15.5 nm, *Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques*, vol. **13**(1), 1, 2019; doi: 10.1134/S1027451019010026
- [4] D.L.Windt, EUV multilayer coatings for solar imaging and spectroscopy, *Proceedings Solar Physics and Space Weather Instrumentation VI*, vol. **9604**, 9604P-1, 2015; doi: 10.1117/12.2188230
- [5] С.В. Кузин, А.А. Перцов, А.С. Кириченко, и др., Космическая аппаратура для астрофизических исследований в проекте Спектр-УФ, *Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, vol. **7**, 49, 2018; doi: 10.7868/S0207352818070077

- [6] А.С. Камруков, Н.П. Козлов, Ю.С. Протасов, Плазодинамические источники излучения высокой спектральной яркости и генераторы сильных ударных волн / в кн. *Радиационная плазодинамика: Материалы I Всесоюзного симпозиума по радиационной плазодинамике*, Москва: Энергоатомиздат, 1991.
- [7] A.V. Pavlov, Y.Y. Protasov, V.D. Telekh, and T.S. Shchepanuk, Laser holographic interferometry of short ultraviolet radiation with high power density interaction with condensed matters, *Scientific Visualization*, vol. **11**(3), 111, 2019; doi: 10.26583/sv.11.3.10
- [8] A.V. Pavlov, T.S. Shchepanyuk, A.S. Skriabin, and V.D. Telekh, Gas Dynamics Processes above the Polymers Surface under Irradiation with Broadband High-Brightness Radiation in the Vacuum Ultraviolet Spectrum Region, *Polymers*, vol. **14**, 3940, 2022; doi: 10.3390/polym14193940
- [9] A.S. Skriabin, V.D. Telekh, A.V. Pavlov, D.S. Pasyukova, et al., Surface Degradation of Thin-Layer Al/MgF₂ Mirrors under Exposure to Powerful VUV Radiation, *Nanomaterials*, vol. **13**(21), 1, 2023; doi: 10.3390/nano13212819
- [10] D.S. Pasyukova, P.A. Novikov, D.O. Novikov, et al., Study of the Surface of Al/MgF₂ Mirrors after Exposure to High-Intensity VUV Radiation, *Physics of Atomic Nuclei*, vol. **86**(9), 2085, 2023; doi: 10.1134/S1063778823090168