

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 533.924

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ Al/MgF_2 ПОСЛЕ ЭКСПОЗИЦИИ ВЫСОКОЯРКОСТНЫМ ВУФ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2023 г. Д. С. Пасынкова^а*, П. А. Новиков^б, Д. О. Новиков^а, В. Д. Телех^а, Д. А. Чесноков^б,
В. Г. Жупанов^б, А. С. Скрыбин^а

^аМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005 Россия

^бАО «Научно-исследовательский институт научно-производственное объединение "ЛУЧ",
Подольск, Московская обл., 142103 Россия

*E-mail: DaryaPasyunkova1503@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.02.2023 г.

После доработки 17.03.2023 г.

Принята к публикации 13.04.2023 г.

В работе было проведено исследование деградации поверхности зеркального покрытия Al/MgF_2 под воздействием ультрафиолетового излучения от высокояркостного широкополосного плазменного источника эрозионного типа. Для управления спектральным составом излучения разряд осуществлялся в среде различных газов — неон, аргон, воздух. Проводилось исследование поверхности образцов на микронанопрофилометре с измерением шероховатости и глубины трещин, возникших после облучения. Было выявлено, что при попадании на образец квантов с энергией, не превышающей 6 эВ, образец претерпел незначительные потери в шероховатости, трещин не наблюдалось. При попадании на образец квантов с энергией $\approx 6\text{--}15$ эВ наблюдалось испарение слоя MgF_2 вблизи источника излучения, глубина трещин достигает до 55 нм. При попадании на образец квантов с энергией до 21 эВ помимо полного испарения покрытия наблюдалась сильная деградация подложки с возникновением трещин глубиной до 200 нм.

Ключевые слова: деградация оптических покрытий, магнитоплазменный компрессор

DOI: 10.56304/S2079562923010190

ВВЕДЕНИЕ

Развитие многослойной оптики привело к возможностям исследования и применения ультрафиолетового (вакуумным, экстремальным) и рентгеновского излучения [1–3]. Многослойная оптика также позволяет активно изучать космическое пространство, в том числе плазму солнечной короны. К примеру, в телескопе Т-170М для детектирования линии водорода L_α , наиболее яркой линии солнечного спектра, которой соответствует длина волны 121.6 нм, используются зеркала с двухслойным покрытием Al/MgF_2 (максимальный коэффициент отражения зеркала для данной длины волны составляет 75%) [4]. Алюминий является отражательным слоем. Фторид магния выступает защитным слоем, чтобы обезопасить отражательный слой от появления оксида, значительно снижающего качество оптики. При появлении оксида на алюминии отражательный слой перестает быть прозрачным для длины волны короче 200 нм.

Вакуумное ультрафиолетовое (ВУФ) излучение, созданное в лабораторных условиях, позволяет смоделировать процессы, происходящие с многослойной оптикой в космическом простран-

стве [5–8] либо в других экстремальных условиях. Моделирование поможет предсказать изменение свойств материалов, их долговечность и стойкость, усовершенствовать конструкцию оптических систем, увеличивая ресурс работы.

Источником ВУФ излучения в данной работе является магнитоплазменный компрессор (МПК) эрозионного типа [9–13]. Преимущество перед другими источниками — получение широкополосного высокояркостного излучения от квазисферического источника. Квазисферичность источника обеспечивает освещенность протяженных объектов. Также данный источник имеет относительно высокий показатель преобразования электрической энергии в энергию излучения (до $\approx 30\%$) и реализует генерацию излучения с высокой степенью повторяемости энергетических и спектральных параметров [14].

В данной работе проводится исследование поверхности двухслойного покрытия Al/MgF_2 после воздействия на него импульсным высокояркостным излучением в различных буферных газах (из-

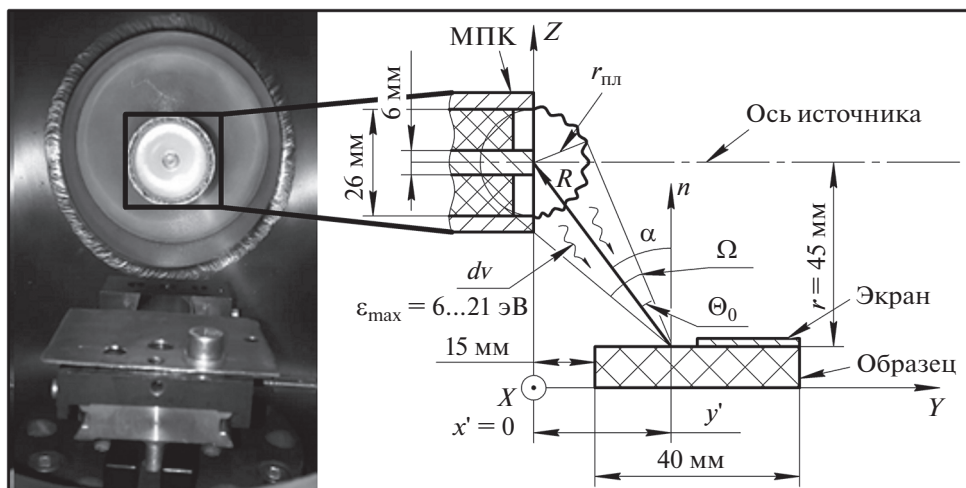


Рис. 1. Фотография образца в камере и схема расчета.

менение коротковолновой границы спектрального диапазона, попадающего на образец).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка “Пучок-М” МГТУ им. Баумана была ранее описана в работе [15], состояла из вакуумной камеры, на торце которой был размещен МПК, состоящий из двух коаксиальных электродов (диаметр внутреннего электрода — 6 мм, внешнего — 26 мм с толщиной стенки 4 мм) и фторопластовой диэлектрической вставки. Первоначально производился откачной процесс воздуха из вакуумной камеры до давления менее 10^{-2} торр, а затем осуществлялся напуск газа в вакуумную камеру до давления 300, 200 или 400 торр (воздух, аргон или неон соответственно). Половина поверхности образца (удаленная от источника излучения) была закрыта экраном для дальнейшего сравнительного анализа поверхности после воздействия. Образцы устанавливались на расстоянии 45 мм от оси МПК. Емкость конденсаторной батареи — 18 мкФ, подаваемое на нее напряжение — 20 кВ. Разряд носит периодический характер (4–5 полупериодов) с максимальной силой тока в первом полупериоде, равной 166 кА, длительностью первого полупериода — 5 мкс.

На подложки из ситалла методом электронно-лучевого и термического резистивного испарения были последовательно нанесены слой алюминия и слой фторида магния соответственно на установке “НИИ НПО “ЛУЧ”. Габариты поверхности, на которую производилось напыление — 15×40 мм. Толщины слоев алюминия (≈ 00 нм) и фторида

магния (≈ 30 нм), контролировались по кварцевому сенсору.

Использование различных газов, в которых производится облучение, позволяет изменять коротковолновую границу излучения, которая определяется первым потенциалом ионизации буферного инертного газа [16] либо поглощением в линиях Шумана–Рунге для кислородосодержащих сред. Так, при облучении образца в воздушной среде на образец приходят кванты, энергия которых не превышает 6 эВ. В аргоне энергия квантов доходит до 15 эВ. При разряде в неоне энергия квантов достигает 21 эВ. Это позволяет регулировать максимальную энергию квантов, приходящих на образец.

Расчет плотности энергии излучения на образец производится с учетом квазисферичности источника излучения. Радиус квазисферического источника — $r_{пл} = 13$ мм. Так как на образец приходит излучение не со всей поверхности сферы, необходимо ввести коэффициент дилуции Δ , характеризующий ослабление плотности потока излучения. Коэффициент дилуции выражается через телесный угол Ω , под которым будет виден источник с элементарной площадкой образца [17]:

$$\Delta = \frac{\Omega}{4\pi}. \quad (1)$$

Телесный угол рассчитывается по формуле, где Θ_0 — угловой размер квазисферического источника:

$$\begin{aligned} \Omega &= 2\pi \int_0^{\Theta_0} \sin \theta d\theta = 2\pi(1 - \cos \Theta_0) = \\ &= 2\pi \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_0}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Схема расчета и фотография позиционирования образца в камере представлены на рис. 1. Элементарная площадка образца находится в плоскости XU в системе координат $XUZY$. Ее центр находится в точке с координатами $(x', y', 0)$. Центр источника находится в точке с координатами $(0, 0, r)$. R – кратчайшее расстояние от источника до элементарной облучаемой площадки образца. α – угол между R и нормалью n к поверхности образца.

В результате введенных координат формула для расчета коэффициента дилуции примет вид:

$$\Delta = \frac{2\pi(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \theta_0})}{4\pi} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{r_{\text{пл}}^2}{R^2}} \right) = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{r_{\text{пл}}^2}{r^2 + x'^2 + y'^2}} \right). \quad (3)$$

Плотность излучения, приходящая на элементарную площадку образца, будет зависеть от угла α по формуле, где W' – энергия излучения плазмы.

$$q(x, y) = \frac{\Delta W' \cos \alpha}{4\pi R^2} = \frac{\Delta W' \cos \alpha}{4\pi(r^2 + x'^2 + y'^2)}. \quad (4)$$

Энергия излучения плазмы рассчитывается через энергию, запасенную в конденсаторе $W = 3.6$ кДж. Предполагая, что в разряд приходит 70% от запасенной энергии, а на излучение приходится 50% от энергии, приходящей в плазму [18, 19], тогда энергия излучения плазмы составит ≈ 1.26 кДж.

Косинус угла между R и нормалью n к поверхности образца рассчитывается по формуле:

$$\cos \alpha = \frac{r}{R} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + x'^2 + y'^2}}. \quad (5)$$

Тогда формула (4) будет иметь вид:

$$q(x, y) = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{r_{\text{пл}}^2}{r^2 + x'^2 + y'^2}} \right) \times \frac{W' r}{4\pi(r^2 + x'^2 + y'^2)^{3/2}}. \quad (6)$$

Результаты расчета плотности энергии, приходящей на образец, приведены в Таблице 1. В таблице также приведена плотность мощности излучения, учитывая тот факт, что максимальное излучение приходится на максимум разрядного тока в первом полупериоде (через ≈ 2 – 5 мкс).

Таблица 1. Результаты расчета излучения, приходящего на образец, в крайних точках открытой зоны образца

r , см	y' , см	q , мДж/см ²	P , Вт/см ²
4.5	1.5	109	$5.42 \cdot 10^4$
4.5	3.5	42.9	$2.15 \cdot 10^4$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На образце № 1 (образец, облученный в воздушной среде) не было замечено никаких визуальных изменений после облучения. На образце № 2 (образец, облученный в аргоне) были ярко выраженные 2 зоны, предположительно, в зоне, ближней к источнику излучения, нет слоя фторид магния. На образце № 3 (образец, облученный в неоне) видно, что покрытие полностью отсутствовало, дополнительно к этому, на подложке были замечены существенные трещины. Характер повреждений образцов после облучения свидетельствует о квазисферичности источника.

На микронанопрофилометре в “НИИ НПО “ЛУЧ” были измерены шероховатости поверхности образцов, изучены развитие трещин и их глубина. На образце № 1 трещин найдено не было. Линия анализа трещин на образце № 2 показана на рис. 2. Рисунок 2а–2д – процесс развития трещин. На рис. 2а изображена граница между облученной и необлученной зоной, первоначально количество трещин увеличивается – растрескивание защитного слоя MgF₂ (рис. 2б). Затем их количество уменьшается, но толщина увеличивается (рис. 2в). Данный процесс происходит из-за истончения слоя MgF₂. После этого на фоне этих трещин наблюдается большое количество тонких трещин, находящихся в расфокусированном состоянии – начало процесса растрескивания отражательного слоя Al (рис. 2г). И далее наблюдается развитие трещин только на отражательном слое – увеличение их количества (рис. 2д). Обнаруженные пятна на образцах являются продуктами эрозии электродов, которые попали на поверхность.

Линия анализа трещин на образце № 3 показана на рис. 3. Необлученная поверхность показана на рис. 3а. На рис. 3б изображена граница между облученной и необлученной зоной. Далее происходит увеличение количества трещин (рис. 3в). Переход от зоны с покрытием к трещинам на подложке показан на рис. 3г.

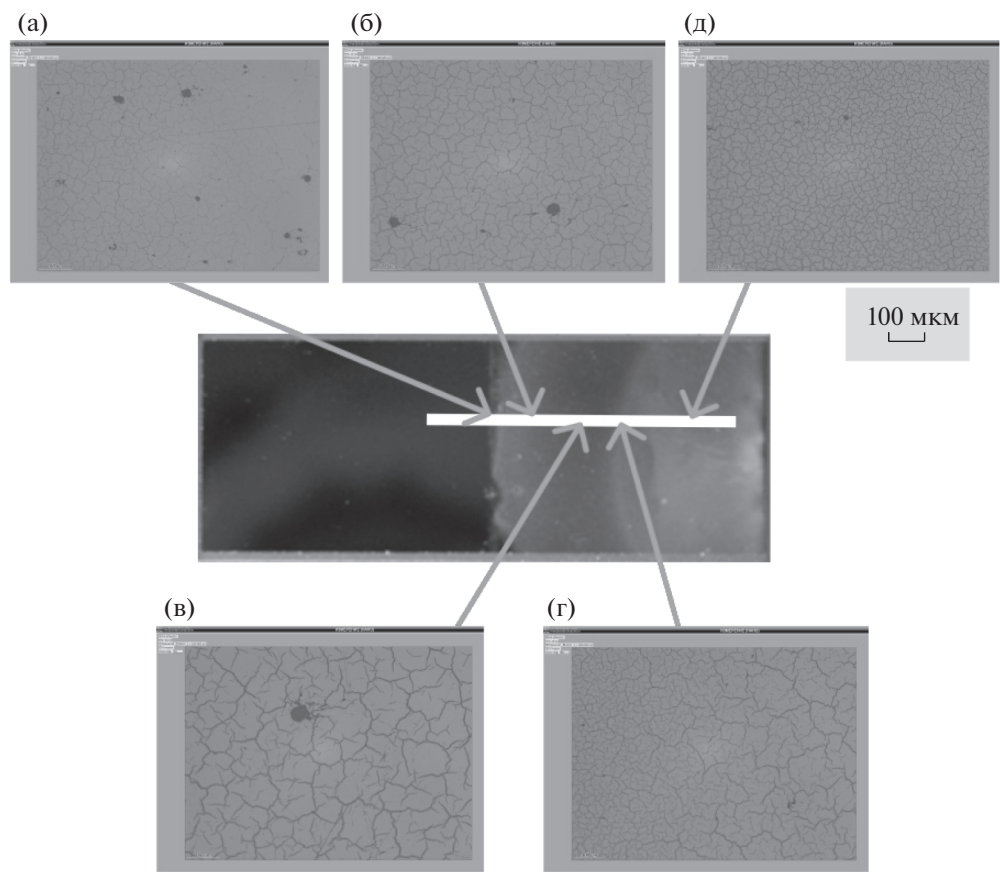


Рис. 2. Морфология поверхности покрытия образца № 2 (облучение в аргоне).

На образце № 2 на границе облученной и необлученной зон глубина трещин составила до 40 нм (рис. 4а). Глубина трещин на защитном слое MgF_2 составила 20–45 нм (рис. 4б). Глубина трещин на

слое Al достигала 55 нм (рис. 4в). Измерения проводились на микронанопрофлометре.
На образце № 3 на границе облученной и необлученной зон глубина трещин составила до 75 нм

Таблица 2. Результаты измерения шероховатости и глубины трещин на микронанопрофилометре

	Шероховатость Ra, нм			Глубина трещин, нм	
$y', \text{ мм}$	30	25	20	25–35	15–25
№ 1	1.4	1.5	1.7	—	—
№ 2	15	16.3	19.5	18–45	До 55
№ 3	75	179	201	40–95	До 200
	До облучения $Ra_1 = 1.4 \text{ нм}$, $Ra_{2,3} = 0.7 \text{ нм}$				

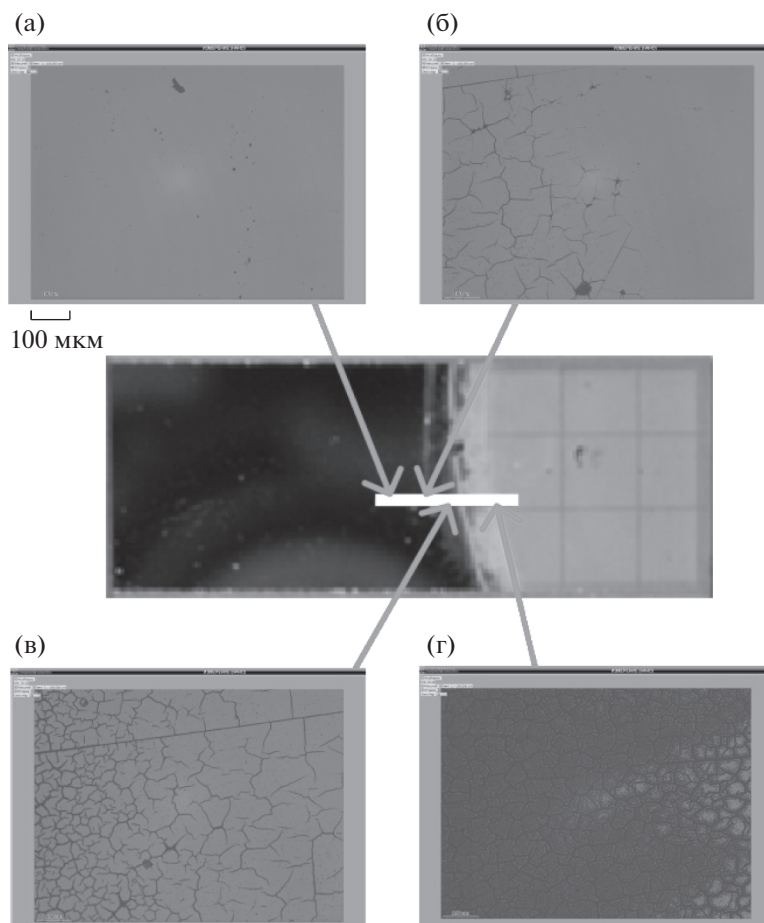


Рис. 3. Морфология поверхности покрытия образца № 3 (облучение в неоне).

(рис. 4г). Глубина трещин на подложке достигает до 200 нм (рис. 4д).

Результаты измерений на микронанопрофилометре приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы было проведено исследование деградации поверхности двухслойного покрытия Al/MgF_2 под воздействием импульсного высокояркого ВУФ излучения от источника типа магнитоплазменный компрессор в зависимости от энергии квантов. Анализ поверхности образцов проводился на микронанопрофилометре. Было выявлено, что при облучении образца в воздушной среде (энергия квантов менее 6 эВ) произошло незначительное увеличение шероховатости, поверхностных дефектов не наблюдалось. Для данных энергий квантов отражательная способность алюминия крайне высока, а слой

фторида магния является прозрачным. При облучении образца в аргоне (энергия квантов менее 15 эВ) наблюдались более выраженная деградация и увеличение шероховатости с развитием трещин, что связано с частичным поглощением излучения двухслойным покрытием (MgF_2 начинает поглощать излучение и испаряться, а коэффициент отражения Al снижается незначительно). В ближней к источнику излучения зоне слой MgF_2 отсутствовал. При облучении образца в неоне (энергия квантов менее 21 эВ) покрытие полностью испарилось, так как коэффициенты отражения алюминия и пропускания фторида магния близки к нулю, все высокоэнергетичные кванты поглощаются покрытием и частично подложкой. Помимо этого, верхние слои ситалла были покрыты глубокими (до 200 нм) трещинами. Плотность энергии излучения не зависит от рода газа, в котором производится облучение, а зависит только от расстояния от источника до исследуемой области.

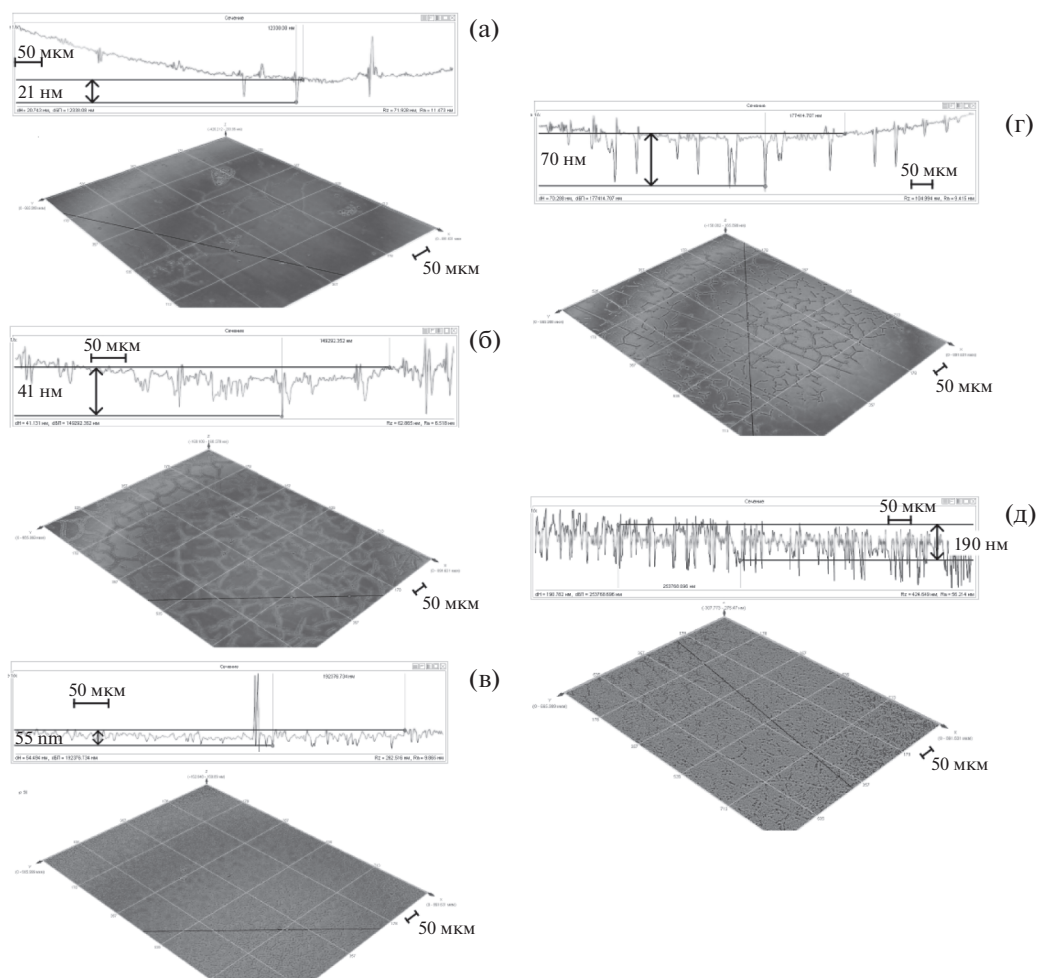


Рис. 4. Расположение трещин по поверхности образцов и их глубина.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научно-го проекта № 20-21-00087 и проведено на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузин С.В., Богачев С.А., Ерхова Н.Ф. и др. // ЖТФ. 2021. Т. 91 (10). С. 1441–1447.
2. Yamamoto M., Yanagihara M., Arai A., et al // Res. Instrum. Sci. Meas. 1990. V. 41. P. 21–24.
3. Сигов А.С., Минаева О.А., Аневский С.И. и др // Росс. технол. журн. 2021. Т. 9 (1). С. 38–47.
4. Жупанов В.Г., Федосеев В.Н., Голышко Е.А. и др // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 92–96.
5. Черкашина Н.И. // Тр. межд. конф. «Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения)». 2010. С. 246–249.
6. Черкашина Н.И., Павленко В.И., Едаменко А.С., Матюхин П.В. // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. С. 130.
7. Павленко В.И., Черкашина Н.И., Манаев В.А., Сидельников Р.В. // Вест. Белгород. гос. технол. ун-в. им. В.Г. Шухова. 2018. № 11. С. 83–90.
8. Гасанов С.К., Ястребинский Р.Н., Павленко В.И. // Усп. совр. естествозн. 2015. № 10. С. 11–14.
9. Kozlov N.P., Protasov Yu.S. // Phys. Lett. A. 1978. V. 67. P. 191–193.
10. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Symmetry. 2021. V. 13 (10). P. 927.
11. Зворыкин В.Д., Камруков А.С., Клементов А.Д. и др // Квантовая электроника. 1977. Т. 4 (2). С. 290–301.
12. Морозов А.И., Ковров П.Е., Виноградова А.К. // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 7 (8). С. 257–260.
13. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. // Appl. Sci. 2022. V. 12 (7). P. 3610.
14. Зворыкин В.Д., Кашиников Г.Н., Клементов А.Д. и др // Квантовая электроника. 1975. Т. 2 (11). С. 2416–2422.

15. Pavlov A.V., Shchepanyuk T.S., Skriabin A.S., Telekh V.D. // *Polymers*. 2022. V. 14. P. 3940.
16. Kamrakov A.S., Kozlov N.P., Protasov Yu.S., Shashkovskii S.G. // *High Temp*. 1989. V. 27. P. 141–155.
17. Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. 1985. Москва: Наука.
18. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. 2017. Москва: Физматлит.
19. Протасов Ю.С., Протасов Ю.Ю., Телех В.Д., Щенников Т.С. // *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Плазменная аэродинамика*. 2014. Москва: Янус-К. Т. IX-4. С. 383–436.

Study of the Surface of Al/MgF_2 Mirrors after Exposure to High-Intensity VUV Radiation

D. S. Pasynkova^{1, *}, P. A. Novikov², D. O. Novikov¹, V. D. Telekh¹, D.A. Chesnokov²,
V. G. Zhupanov², and A. S. Skriabin¹

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia*

²*LUCH Research and Production Association, Research and Development Institute,
Podolsk, Moscow oblast, 142103 Russia*

*e-mail: DaryaPasynkova1503@yandex.ru

Received February 13, 2023; revised March 17, 2023; accepted April 13, 2023

Abstract—The degradation of the surface of the Al/MgF_2 mirror coating under influence of UV radiation is investigated. The source of VUV radiation is erosion-type magneto-plasma compressor. Discharge is carried out in different gases (neon, argon, air) to control radiation spectrum. Roughness, 2D and 3D profiles, depth of cracks on the surface of the samples were studied using micronanoprofilometer. If the energy of quanta reaching the sample is less than 6 eV, slight increase of roughness and no cracks are observed on the surface of the sample. Energy of quanta is 6–15 eV – MgF_2 layer partly-completely evaporates, roughness increases gradually, depth of the cracks reaches 55 nm. Energy of quanta is less than 21 eV – coating completely evaporates, degradation of the substrate with the cracks (depth – less than 200 nm) is observed.

Keywords: degradation of optical coatings, magneto-plasma compressor