

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ Al_2O_3/MgF_2 НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Макарцов И.О.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Аваков С.М. – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе исследовано влияние двухслойного просветляющего покрытия Al_2O_3/MgF_2 на шероховатость поверхности оптических деталей. Показано, что нанесение покрытия сопровождается увеличением параметров шероховатости поверхности и среднеквадратического отклонения, причем величина изменения зависит от исходного качества полировки образца. Полученные результаты свидетельствуют о существенной роли исходного состояния поверхности в формировании конечного микрорельефа покрытия Al_2O_3/MgF_2 .

Ключевые слова. двухслойное просветляющее покрытие, оксид алюминия, фторид магния, шероховатость поверхности, микрорельеф, тонкие пленки, оптические детали, интерферометрия, кварцевые свидетели, электронно-лучевое испарение.

Введение. В связи с развитием проецирующих систем для оборудования микроэлектронной промышленности в направлении сокращения длины волны излучения предъявляются все более высокие требования к прецизионной оптике с низким уровнем рассеяния в УФ- и ГУФ-диапазонах. Шероховатость поверхности оптических деталей рассматривается как один из факторов, вызывающих рассеяние света [1]. Для оптических систем, работающих в ГУФ-диапазоне, даже незначительное рассеяние может приводить к снижению контраста изображения и появлению паразитных засветок, что особенно существенно при формировании топологических элементов субмикронного размера.

Материалы Al_2O_3 и MgF_2 применяются для формирования просветляющих покрытий, используемых в прецизионной оптике, в том числе для ультрафиолетового диапазона. Для нанесения данных материалов часто используется метод электронно-лучевого испарения, применяемый для получения многослойных оптических систем. Слой Al_2O_3 обладает более высокой плотностью и подвижностью атомов, может способствовать частичному сглаживанию микрорельефа подложки и снижению исходной шероховатости [2]. В то же время слой MgF_2 , обеспечивающий низкий показатель преломления, при температуре подложки порядка 494 К может формироваться с частично выраженной столбчатой морфологией, что, согласно литературным данным, может приводить к увеличению микронеровностей поверхности и изменению эффективного показателя преломления [3, 4]. По экспериментальным данным может наблюдаться изменение состояния поверхности, влияющее на интерференционные условия, заложенные при проектировании покрытия. Целью работы является исследование изменения микрорельефа поверхности кварцевых деталей после нанесения двухслойного покрытия Al_2O_3/MgF_2 .

Основная часть. В эксперименте были использованы: sv1 – образец с механически отполированной поверхностью; sv2 – образец с механически отполированной поверхностью, дополнительно обработанный ионным пучком. Двухслойное просветляющее покрытие нанесено на установке электронно-лучевого испарения при температуре подложки 494 К. Параметры режима напыления были выбраны для достижения приемлемого коэффициента пропускания образцов на уровне 99%.

Для оценки влияния нанесения просветляющего покрытия Al_2O_3/MgF_2 на морфологию поверхности образцов был выполнен интерферометрический и профилометрический контроль образцов (рисунок 1) до и после напыления. Анализ проводился по параметрам:

среднеквадратическое отклонение (RMS), среднее арифметическое отклонение профиля (R_a) и максимальную высоту неровностей профиля (PV) (таблица 1).

В первую очередь рассмотрим изменения параметров поверхности для образца sv2, обладающего прецизионным качеством обработки. У образца sv2 значение RMS увеличилось с 2,06 нм до 3,17 нм. Среднее арифметическое отклонение профиля R_a изменилось с 0,33 нм до 0,37 нм. При этом параметр PV изменился незначительно. Это свидетельствует об отсутствии макродефектов напыления и указывает на то, что изменения происходят преимущественно на уровне микрошероховатости поверхности.

Наблюдаемое увеличение шероховатости может быть связано с особенностями формирования тонкопленочной структуры MgF_2 при вакуумном напылении. При температуре подложки порядка 494 К повышается подвижность атомов, что способствует уплотнению пленки, росту зерен и формированию кристаллитов [3, 4].

Таблица 1 – Измеренные параметры шероховатости поверхности до и после нанесения покрытия для двух образцов

свидетель	без покрытия		с покрытием	
	sv1	sv2	sv1	sv2
RMS, nm	6,37	2,06	9,84	3,17
PV, nm	49,09	59,59	54,15	61,95
R_a, nm	0,43	0,33	0,49	0,37

Согласно модели структурных зон, морфология пленок определяется соотношением T_s/T_m (где T_s – температура подложки, а T_m – температура плавления материала). В области $T_s/T_m \approx 0,3$, согласно модели, наблюдается переход от пористой структуры к более плотной, с формированием зерен [5]. Границы таких зерен формируют дополнительный микрорельеф поверхности, который накладывается на исходную шероховатость подложки, что приводит к увеличению параметров RMS и R_a .

Дополнительным фактором может являться многослойная структура покрытия. Использование материалов Al_2O_3 и MgF_2 с различными термомеханическими свойствами приводит к возникновению внутренних напряжений при охлаждении после напыления. Релаксация этих напряжений может вызывать микродеформации поверхностного слоя и увеличение высокочастотной составляющей микрорельефа [6].

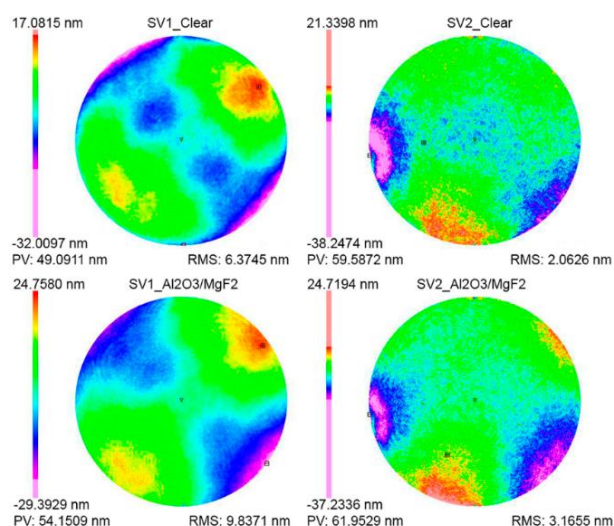


Рисунок 1 – Интерферограммы исследуемых образцов: sv1 – образец с механически отполированной поверхностью; sv2 – образец с механически отполированной поверхностью, дополнительно обработанный ионным пучком

Для оценки корректности полученных результатов было выполнено сравнение экспериментальных данных с литературными значениями шероховатости тонких пленок MgF_2 , сформированных методами физического осаждения при близких температурных условиях (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение экспериментальных и литературных данных по шероховатости

Параметр	sv2 без покрытия	sv2 с покрытием	Литературные данные [7, 8]
RMS , nm	2,06	3,17	0,5 – 5,0
R_a , nm	0,33	0,37	0,4 – 1,0

Из таблицы 2 следует, что полученные значения параметров шероховатости находятся в диапазоне, сопоставимом с литературными данными [7, 8]. Следует отметить, что величина шероховатости в значительной степени определяется условиями формирования пленки, включая метод осаждения, температуру подложки и энергетические параметры процесса, в связи с чем наблюдается разброс значений. Отмечается, что значение параметра R_a после нанесения покрытия находится на нижней границе характерных значений, что может свидетельствовать о формировании относительно однородного поверхностного слоя.

Дополнительно был проведен сравнительный анализ образцов sv1 и sv2, отличающихся качеством исходной полировки поверхности. Результаты измерений показали, что для образца sv1 значение RMS увеличилось с 6,37 до 9,84 нм, тогда как для образца sv2 – с 2,06 до 3,17 нм. Абсолютный прирост RMS для sv1 составил 3,47 нм, что примерно в три раза превышает аналогичное значение для sv2, равное 1,11 нм. Аналогичная тенденция наблюдается и для параметра R_a : для sv1 он увеличился с 0,43 до 0,49 нм, а для sv2 – с 0,33 до 0,37 нм. Полученные результаты показывают воспроизводимость морфологии подложки. При повышенной исходной шероховатости возрастает неоднородность роста тонкой плёнки. Развитый микрорельеф поверхности создаёт условия для локального затенения и неравномерного осаждения материала, что может приводить к формированию менее однородной структуры покрытия.

Заклучение. В ходе работы установлено, что нанесение двухслойного покрытия Al_2O_3/MgF_2 на предварительно подготовленную подложку сопровождается незначительным увеличением шероховатости поверхности, при этом для подложек с более низким качеством исходной полировки наблюдается более выраженный рост RMS и R_a , что указывает на определяющее влияние исходного состояния поверхности на формирование морфологии покрытия. Наблюдаемые изменения связаны с наследованием микрорельефа подложки, особенностями роста слоя MgF_2 , и влиянием внутренних напряжений в многослойной системе. Для оптических систем, работающих в УФ- и ГУФ-диапазонах, шероховатость поверхности является ключевым параметром, поскольку с уменьшением длины волны вклад шероховатости в диффузионное рассеяние возрастает. Даже незначительные микронеровности приводят к снижению контраста изображения и появлению паразитной засветки [9]. Обеспечение низкой исходной шероховатости подложки и высокого качества её предварительной обработки является необходимым условием получения покрытий с требуемыми оптическими характеристиками в ГУФ-диапазоне.

Список литературы:

1. Apostol, B. F. Scattering of the electromagnetic waves from a rough surface // *Journal of Modern Optics*. – 2012. – Vol. 59, No. 18. – P. 1607–1616. – DOI: 10.1080/09500340.2012.729617.
2. Denisov, D. G. Influence of substrate roughness on light scattering of optical coatings / D. G. Denisov, O. F. Prosovsky, Yu. O. Prosovsky // *Proceedings of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*. – 2020. – № 4. – P. 82–90.
3. Gupta, R. Temperature-dependent optical and mechanical properties of MgF_2 thin films / R. Gupta, A. Sharma // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 357. – P. 160–166.
4. Zhang, X. Influences of oxygen ion beam on MgF_2 thin films / X. Zhang, Y. Li, H. Wang // *Coatings*. – 2019. – Vol. 9, № 12. – P. 834. – DOI: 10.3390/coatings9120834.
5. Thornton J. A. Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings / J. A. Thornton // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1974. – Vol. 11, No. 4. – P. 666–670. DOI: 10.1116/1.1312732.
6. Abadias G., et al. Review Article: Stress in thin films and coatings: Current status, challenges, and prospects // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 2018. – Vol. 36, No. 2. – Art. 020801. – DOI: 10.1116/1.5011790.
7. Ristau D., Günster S., Bosch S., et al. Ultraviolet optical and microstructural properties of MgF_2 and LaF_3 coatings deposited by ion-beam sputtering and boat and electron-beam evaporation // *Applied Optics*. – 2002. – Vol. 41, No. 16. – P. 3196–3204. – DOI: 10.1364/AO.41.003196.
8. Reuna J., et al. Influence of ex-situ annealing on the properties of MgF_2 thin films deposited by electron beam evaporation // *Optical Materials*. – 2019. – Vol. 96. – 109326. – DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109326.

UDC 621.3

ANALYSIS OF THE EFFECT OF A TWO-LAYER $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ AR COATING ON THE SURFACE ROUGHNESS OF OPTICAL COMPONENTS

I.O. Makartsov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

S.M. Avakov – Dr. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ETT

Annotation. This study investigated the effect of a two-layer $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ antireflection coating on the surface roughness of optical components. It was shown that coating application is accompanied by an increase in surface roughness parameters and standard deviation, with the magnitude of the change depending on the initial polishing quality of the sample. The results demonstrate the significant role of the initial surface condition in shaping the final microrelief of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ coating.

Keywords. dual-layer antireflection coating, aluminum oxide, magnesium fluoride, surface roughness, microrelief, thin films, optical components, interferometry, quartz crystals, electron beam evaporation.