

НАНЕСЕНИЕ ДВУХСЛОЙНОГО ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ Al_2O_3/MgF_2 МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ С ИОННЫМ АССИСТИРОВАНИЕМ

Макарьцов 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 данной работе исследуется влияние ионного ассистирования (ИА) на оптические характеристики двухслойного покрытия Al_2O_3/MgF_2 , полученного методом электронно-лучевого испарения. На основе анализа полученных спектральных зависимостей показано, что ионное воздействие приводит к выравниванию коэффициента отражения. Это позволяет стабилизировать показатель преломления материала и минимизировать пористость покрытия. Результаты подтверждают эффективность частичного использования ИА для создания прецизионных оптических систем с высокой спектральной стабильностью.

Ключевые слова. Ионное ассистирование, электронно-лучевое испарение, тонкие пленки, двухслойные покрытия, оптические покрытия, плотность покрытия, вакуумное напыление, коэффициент отражения, оксид алюминия, фторид магния.

Введение. В современной прецизионной оптике особое значение имеют просветляющие покрытия, обеспечивающие минимизацию отражения в заданном спектральном диапазоне и повышение светопропускания оптических элементов [1]. Такие покрытия востребованы в проецирующих системах для оборудования микроэлектронной промышленности, где даже небольшие потери на отражение могут существенно ухудшать рабочие характеристики системы, снижать контраст изображения и создавать паразитные засветки [2]. Для УФ- и ГУФ-диапазона, требования к качеству тонкопленочных покрытий особенно жесткие, поскольку здесь возрастает влияние дефектов структуры, остаточной пористости и отклонений толщины от расчетных значений [3].

Одной из технологий повышения качества тонких пленок является ионное ассистирование в процессе осаждения. Оно позволяет модифицировать морфологию пленки, повышать ее плотность, улучшать адгезию к подложке и снижать уровень пористости [4, 5]. В качестве материала просветляющей системы в диапазоне длин волн 200 – 400 нм часто используются двухслойные покрытия на основе оксида алюминия и фторида магния, поскольку комбинация Al_2O_3/MgF_2 позволяет формировать требуемое соотношение показателей преломления и получать коэффициент отражения в ультрафиолетовой области [6].

Целью данной работы является анализ влияния ионного ассистирования на оптические характеристики просветляющего покрытия Al_2O_3/MgF_2 . В работе рассматриваются физические основы процесса, механизмы формирования пленок, а также сравнение расчетных и экспериментальных спектров отражения для вариантов без ассистирования и с ассистированием. Особое внимание уделяется положению волны просветления на длине 248 нм и связи полученных результатов с физикой происходящих процессов.

Основная часть. Ионное ассистирование представляет собой дополнительное воздействие ионного потока на растущую плёнку в процессе осаждения (рисунок 1). В ходе этого процесса поверхность формируемого слоя подвергается бомбардировке ионами инертных или реакционноспособных газов, что приводит к передаче энергии атомам и изменению кинетики роста плёнки. В результате повышается подвижность частиц на поверхности, уменьшается пористость, увеличивается плотность и улучшается адгезия

покрытия к подложке. Кроме того, ионное воздействие способствует формированию более однородной структуры, снижению дефектности и улучшению оптических характеристик тонкоплёночных систем, что особенно важно для высокоточных оптических покрытий.

Для слоя Al_2O_3 такое воздействие особенно полезно, поскольку оксидные плёнки, сформированные без дополнительной энергии частиц, могут обладать рыхлой или колонковой структурой, обусловленной ограниченной подвижностью адатомов на поверхности [7, 8]. Ионное ассистирование способствует передаче дополнительной энергии в приповерхностный слой, что приводит к более плотной упаковке материала, снижению шероховатости и стабилизации оптических констант плёнки, а также позволяет наносить пленки при более низких температурах подложки [9, 10]. В результате изменяются как морфология слоя, так и его эффективная толщина и показатель преломления, которые становятся чувствительными к параметрам ионного воздействия [9–11]. Для плёнок Al_2O_3 , полученных без ионного ассистирования и недостаточной энергии частиц, характерны повышенная пористость и менее упорядоченная структура, тогда как при включении ионного потока происходит уменьшение доли свободного объёма и формирование более компактной микроструктуры [7, 9]. Это особенно важно для просветляющих покрытий, работающих в УФ-диапазоне, поскольку в коротковолновой области даже незначительные изменения плотности и морфологии приводят к заметным изменениям спектральных характеристик [10, 11].

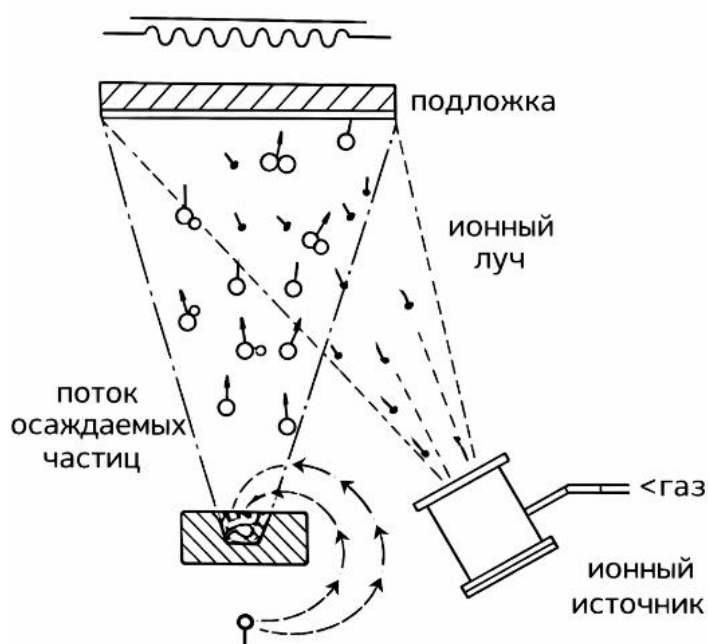


Рисунок 1 – Схема нанесения покрытия методом электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента отражения покрытия Al_2O_3/MgF_2 от режима осаждения. Пленки наносились при температуре подложки 494 К электронно-лучевым методом без ассистирования в одном случае и в другом с ассистированием ионами аргона слоя Al_2O_3 . Физические толщины пленок были рассчитаны заранее и выдерживались во всех режимах осаждения. На рисунке видно различие полученных результатов с теоретическим расчетом.

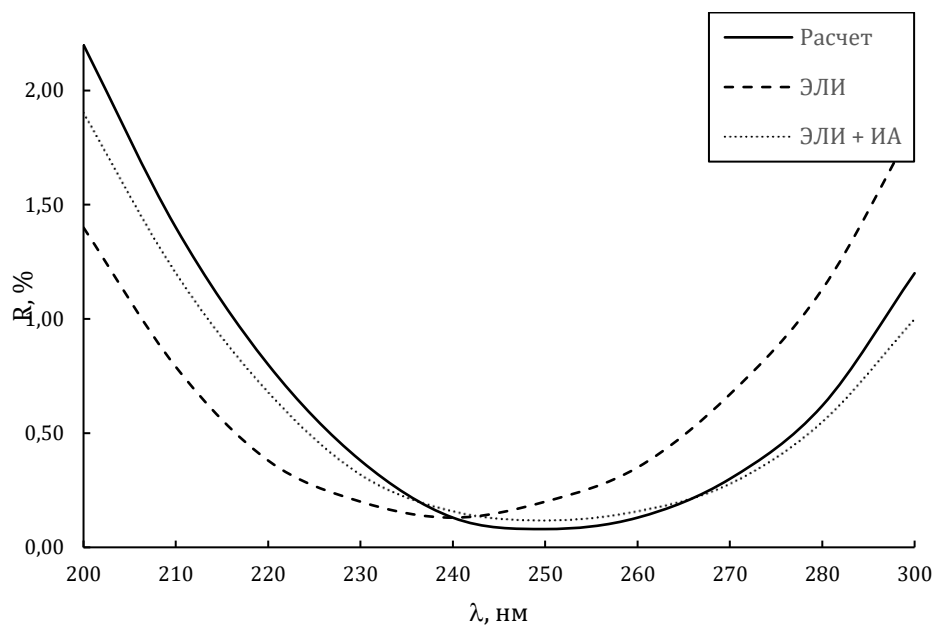


Рисунок 2 – Спектральная зависимость коэффициента отражения $R(\lambda)$ покрытия Al_2O_3/MgF_2 , полученного методом электронно-лучевого испарения (ЭЛИ) и с ионным ассистированием (ЭЛИ + ИА), в сравнении с расчётным спектром

Полученные результаты показывают, что при ионном ассистировании спектральная зависимость коэффициента отражения покрытия Al_2O_3/MgF_2 в большей степени соответствует расчётной. При этом положение минимума отражения оказывается ближе к заданной длине волны, в частности к области 248 нм. Наблюдаемые особенности могут быть связаны с изменением структуры формируемого слоя Al_2O_3 под воздействием ионного потока, в том числе с уменьшением пористости и изменением эффективных оптических параметров, что отмечается в ряде работ.

Различия между образцами, полученными без ассистирования и с ионным ассистированием, проявляются в форме спектральной зависимости коэффициента отражения. Для покрытия без ассистирования наблюдается большее отклонение от расчётной кривой в фиолетовую сторону спектра, а также смещение минимума отражения, что может быть связано с более рыхлой структурой слоя и его чувствительностью к воздействию окружающей среды, включая влагу, абсорбированную после извлечения образца из камеры. При использовании ионного ассистирования экспериментальная зависимость оказывается ближе к расчётной, что также может быть обусловлено изменением плотности и морфологии плёнки.

Заключение. В работе проведено сравнение спектральной зависимости коэффициента отражения покрытий Al_2O_3/MgF_2 , полученных методом электронно-лучевого испарения при различных режимах осаждения, с результатами теоретического расчёта. Показано, что применение ионного ассистирования при формировании слоя Al_2O_3 приводит к лучшему совпадению экспериментальной зависимости $R(\lambda)$ с расчётной, а также к стабилизации положения минимума отражения вблизи заданной длины волны. Наблюдаемые различия между покрытиями, полученными с и без ионного ассистирования связаны с изменением условий формирования слоя и его эффективных оптических параметров. Полученные результаты согласуются с представлениями о влиянии дополнительного энергетического воздействия на процессы роста тонких плёнок.

Для задач прецизионной оптики в УФ- и ГУФ-диапазоне, важное значение имеют стабильность параметров покрытия и согласование экспериментальных характеристик с расчётными. Ионное ассистирование может быть использовано как один из способов повышения воспроизводимости свойств покрытий и приближения их оптических характеристик к заданным значениям.

Список литературы:

1. H. K. Raut, V. A. Ganesh, A. S. Nair, S. Ramakrishna, "Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review," *Energy Environ. Sci.* (2011). DOI: 10.1039/C1EE01297E.
2. L. E. Busse et al., "Review of antireflective surface structures on laser optics and windows," *Appl. Opt.* 54, F303–F310 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.00F303.
3. W. Bogaerts et al., "Fabrication of photonic crystals in silicon-on-insulator using 248-nm deep UV lithography," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 8(4), 928–934 (2002). DOI: 10.1109/JSTQE.2002.800845.
4. John R. McNeil, Alan C. Barron, S. R. Wilson, W. C. Herrmann, "Ion-assisted deposition of optical thin films: low energy vs high energy bombardment," *Applied Optics* 23(4), 552–559 (1984). DOI: 10.1364/AO.23.000552.
5. Michael Nastasi, James Mayer, James K. Hirvonen, "Ion beam assisted deposition," in *Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications* (1996). DOI: 10.1017/CBO9780511565007.014.
6. Konstanty Marszalek, Paweł Winkowski, Marta Marszalek, "Antireflective bilayer coatings based on Al₂O₃ film for UV region," *Materials Science-Poland* 33(1), 6–10 (2015). DOI: 10.1515/msp-2015-0011.
7. O. Zywitzki et al., *Surface and Coatings Technology* 151–152 (2002) 14–20. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01632-2
8. J. A. Thornton, "Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings," *J. Vac. Sci. Technol.* 11 (1974). DOI: 10.1116/1.1312732
9. M. S. Al-Robaee et al., *Journal of Materials Research* 9(10) (1994). DOI: 10.1557/JMR.1994.2688.
10. J. R. McNeil et al., *Applied Optics* 23(4) (1984). DOI: 10.1364/AO.23.000552.
11. J. R. Nightingale et al., *MRS Proc.* 983 (2007). DOI: 10.1557/PROC-983-0983-LL05-01.

UDC 621.3

DEPOSITION OF Al₂O₃/MgF₂ BILAYER ANTIREFLECTION COATING BY ION-ASSISTED ELECTRON-BEAM EVAPORATION

I.O. Makartsov

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

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

Annotation. This paper examines the effect of ion-assisted coating (IA) on the optical properties of a bilayer Al₂O₃/MgF₂ coating produced by electron beam evaporation. Analysis of the resulting spectral dependences demonstrates that ion-assisted coating leads to a leveling of the reflectivity. This stabilizes the refractive index of the material and minimizes coating porosity. The results confirm the effectiveness of using partial IA for creating precision optical systems with high spectral stability.

Keywords. Ion-assisted deposition, electron-beam evaporation, thin films, bilayer coatings, optical coatings, coating density, vacuum deposition, reflectance, aluminum oxide, magnesium fluoride.