

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ОПТИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Макарицов И.О., Ходяков И.В.

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

Научные руководители: Аваков С.М. – д-р т. н., Трапашко Г.А. – к. т. н.

Аннотация. В работе представлен метод расчета коэффициента отражения для двухслойного антиотражающего покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ на кварцевой подложке. Проведено моделирование в диапазоне длин волн 200–1000 нм. Результаты демонстрируют минимум отражения (0,22%) при проектной длине волны 355 нм, что соответствует четвертьволновой оптимизации. Для верификации модели выполнено сравнение с экспериментальными данными. Визуализация данных подтверждает интерференционные эффекты и зависимость от длины волны.

Ключевые слова. Двухслойные оптические покрытия, коэффициент отражения, интерференция, дисперсия, антиотражающее покрытие.

Введение. Физический принцип функционирования многослойных интерференционных покрытий основан на явлении интерференции световых волн, отражающихся от границ раздела слоёв с различными оптическими свойствами [1]. При падении электромагнитного излучения на многослойную структуру происходит множественное отражение волн на межслойных границах, характеризующихся разными значениями коэффициента преломления. Возникающие при этом отраженные волны вступают в когерентное взаимодействие, результатом которого является интерференционная картина.

Деструктивная интерференция, обеспечивающая минимизацию коэффициента отражения, наблюдается при выполнении условия фазового сдвига между интерферирующими волнами, равного полуволновому сдвигу. В этом случае происходит взаимная компенсация амплитуд электромагнитных колебаний.

Критическим параметром при проектировании покрытия является оптическая толщина слоёв, которая должна составлять $\lambda/4$ для целевой длины волны [2]. Это условие обеспечивает формирование требуемого фазового сдвига при нормальном падении излучения.

Основным фактором, влияющим на коэффициент преломления света, является показатель преломления материала. Использование материалов с разными показателями преломления позволяет точнее настраивать процесс интерференции и добиваться минимизации отражения в заданном диапазоне длин волн. Также немаловажным фактором является угол падения света. Изменение угла падения электромагнитного излучения на поверхность многослойной структуры вызывает изменение фазовых характеристик отраженных волн, что приводит к трансформации интерференционной картины и, как следствие, изменению спектрального распределения интенсивности отраженного излучения. Важно учитывать этот фактор при проектировании покрытий для различных условий освещения.

В данной работе рассмотрено покрытие, состоящее из двух слоев:

- MgF_2 с показателем преломления $n_1 = 1,38$;
- Al_2O_3 с показателем преломления $n_2 = 1,63$.

Двухслойная структура нанесена на кварцевую подложку с показателем преломления $n_3 = 1,46$, при этом внешней средой является воздух ($n_0 = 1,0$). Геометрическая толщина

каждого слоя рассчитывается для обеспечения соответствия оптической толщины величине $\lambda/4$, где λ – расчётная длина волны, равная 355 нм. Схематическое изображение оптической системы представлено на рисунке 1.

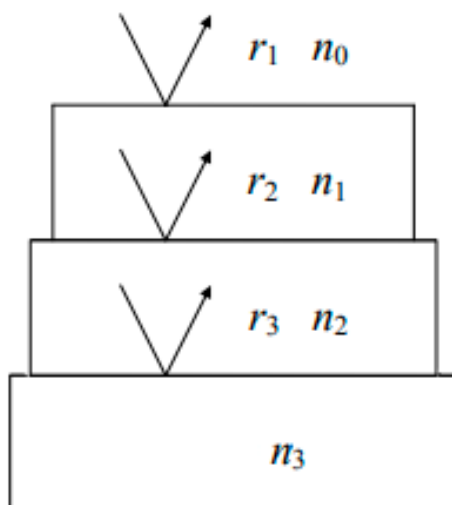


Рисунок 1 – Схема исследуемой оптической структуры

Основная часть. Для моделирования каждый слой описывается матрицей интерференции I_{ij} и матрицей распространения L_i [3]:

$$I_{ij} = \frac{1}{1 + r_{ij}} \begin{bmatrix} 1 & r_{ij} \\ r_{ij} & 1 \end{bmatrix}, r_{ij} = \frac{n_j - n_i}{n_j + n_i}. \quad (1)$$

$$L_i = \begin{bmatrix} e^{-i\varphi_i} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_i} \end{bmatrix}, \varphi_i = \frac{2\pi n_i d_i}{\lambda}, \quad (2)$$

где n_i, n_j – показатели преломления сред,

d_i – толщина слоя, φ_i – фазовая толщина слоя,

r_{ij} – амплитудный коэффициент отражения.

Коэффициенты i, j принимают значения $[0; m]$, где m равняется количеству сред в исследуемой оптической структуре.

Результирующая матрица системы:

$$M = I_{01} \cdot L_1 \cdot I_{12} \cdot L_2 \cdot I_{23}. \quad (3)$$

Коэффициент отражения:

$$R = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2 \quad (4)$$

Коэффициент отражения R_0 кварца без покрытия:

$$R_0 = \left(\frac{n_3 - n_0}{n_3 + n_0} \right)^2 = 3,5\%. \quad (5)$$

На рисунке 2 показана зависимость $R(\lambda)$. Минимум отражения ($R = 0,22\%$) достигается при $\lambda = 355$ нм. Моделирование показало, что на контрольной длине волны $\lambda =$

355 нм коэффициент отражения для двухслойного покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ существенно меньше, чем для подложки без покрытия, которое равняется 3,5%.

График зависимости коэффициента отражения $R(\lambda)$ показывает:

- минимум коэффициента отражения вблизи контрольной длины волны.
- рост коэффициента отражения за пределами рабочего диапазона, что связано с изменением условий интерференции.

Для подтверждения модели, экспериментальным путем были получены коэффициенты отражения кварцевого стекла с покрытием и без, представленные на рисунке 3.

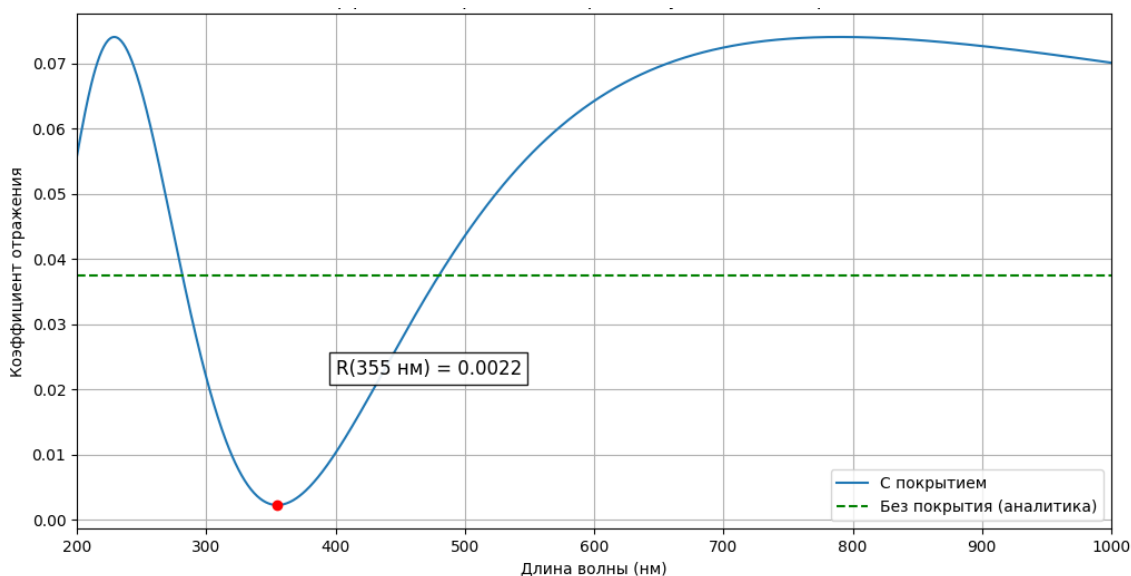


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента отражения (R) от длины волны

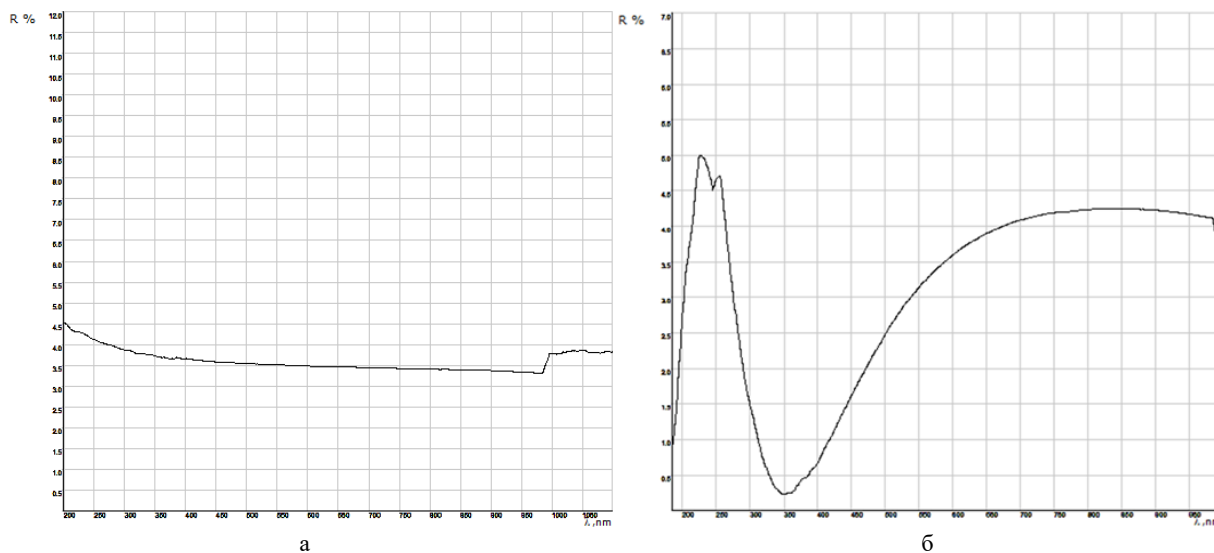


Рисунок 3 – Графики зависимости коэффициента отражения от длины волны:
а – без покрытия, б – с покрытием

По экспериментальным данным получено, что среднее значение коэффициента отражения кварцевого стекла без покрытия равняется 3,611%, что подтверждает расчетные данные. Коэффициент отражения с покрытием при длине волны 355 нм равен 0,25%, что указывает на высокую точность модели.

Заключение. Математическое моделирование двухслойных оптических покрытий представляет собой эффективный инструмент для анализа и оптимизации их оптических характеристик. В данном исследовании был рассчитан коэффициент отражения $R(\lambda)$ для двухслойного покрытия из $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$, нанесенного на кварцевое стекло.

Результаты моделирования показали, что при заданной длине волны $\lambda = 355$ нм коэффициент отражения значительно снижается в сравнении с подложкой без покрытия. Это свидетельствует о высокой эффективности предложенного покрытия в минимизации отражения, что подтверждает корректность выбранной модели и подхода. Полученные математические расчеты подтверждены экспериментальными данными.

Математическое моделирование позволило:

- рассчитать оптимальные толщины слоев для минимизации отражения на заданной длине волны;
- получить графическую зависимость коэффициента отражения от длины волны, что позволяет наглядно оценить эффективность покрытия в различных спектральных диапазонах;
- подтвердить, что выбор материалов с различными показателями преломления и точное управление толщинами слоев имеют решающее значение для достижения требуемых характеристик покрытия.

Кроме того, результаты моделирования могут быть использованы для дальнейших исследований в области многослойных покрытий, включая расширение модели для более сложных многослойных структур и учёт влияния углов падения света. Применение подобных методов в промышленности и научных исследованиях позволит создавать более эффективные покрытия для широкого спектра оптических устройств, включая лазеры, оптические фильтры, антиотражающие покрытия и другие высокотехнологичные системы.

Таким образом, математическое моделирование является мощным инструментом для разработки и оптимизации оптических покрытий, обеспечивая высокую точность вычисления их характеристик и позволяя эффективно решать задачи, связанные с улучшением оптических свойств материалов.

Список литературы

1. Macleod H. A. *Thin-Film Optical Filters* / H. A. Macleod. – 5th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 696 p.
2. Минайчев В. Е. *Нанесение пленок в вакууме. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. Книга 6* / В. Е. Минайчев. – Москва: Высшая школа, 1989. – 111 с.
3. Путилин Э.С., *Оптические покрытия. Учебное пособие*. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010 – 227с.

UDC 535-92

MATHEMATICAL MODELING OF THE REFLECTION COEFFICIENT IN A TWO-LAYER $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ OPTICAL COATING

Makartsou I.O., Khadziakou I.V.

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

Avakov S.M. – Grand Cand. of Sci. in Engineering sciences, Trapashko G.A. – Cand. of Sci. in Engineering sciences

Annotation. This study presents a method for calculating the reflection coefficient of a two-layer anti-reflective $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ coating on a quartz substrate. Simulations were performed across the wavelength range of 200–1000 nm. The results reveal a reflection minimum (0.22%) at the design wavelength of 355 nm, consistent with quarter-wave optimization. To verify the model, comparisons with experimental data were conducted. Data visualization confirms the presence of interference effects and wavelength-dependent behavior.

Keywords. Two-layer optical coatings, reflection coefficient, interference, dispersion, anti-reflective coating.