

МИНИМИЗАЦИЯ ОТРАЖЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО СВЕТА ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ С АНТИБЛИКОВЫМ ПОКРЫТИЕМ¹

Е. А. Чудаков, А. Б. Сотский, Д. В. Понкратов, Н. И. Стаськов

(Учреждение образования «Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова»,
кафедра физики и компьютерных технологий)

Получены аналитические выражения для отражательной способности интерференционного покрытия на подложке конечной толщины в условиях частично когерентного освещения. Исследованы возможности оптимизации антибликовых покрытий в виде чередующихся слоев SiO_2 , ZrO_2 , MgF_2 , нанесенных на плоскопараллельную пластину поликарбоната миллиметровой толщины. Показано, что оптимальный выбор толщин слоев позволяет существенно снизить отражение света от пластины.

Интерференционные покрытия, наносимые на плоскопараллельные пластины, востребованы при разработке различных фотоприемных устройств в солнечной энергетике, медицине и строительстве. Известны методы расчета таких покрытий, основанные на когерентном приближении [1–3]. Однако такое приближение оправдано лишь в случаях, когда толщина структуры интерференционного покрытия – подложка много меньше длины когерентности, которая для солнечного света имеет микронный порядок. Та-

¹ Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «Фотоника и электроника для инноваций», задание 1.15.

ким образом, для слабо поглощающих подложек миллиметровой толщины когерентное приближение при расчете нанесенных на их поверхность интерференционных покрытий утрачивает свою применимость.

В докладе проблема минимизации солнечных бликов от стекол рассматривается с позиций применения интерференционных покрытий в случае широких диапазонов длин волн $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$, где $\lambda_{\max} - \lambda_{\min} \sim 100$ нм и углов падения естественного света $0 \leq \theta \leq \theta_{\max}$, где $\theta_{\max} \sim 50^\circ$.

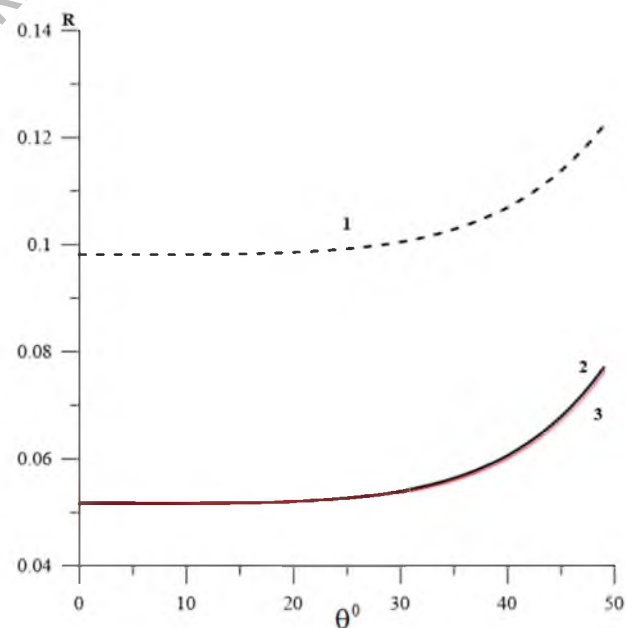
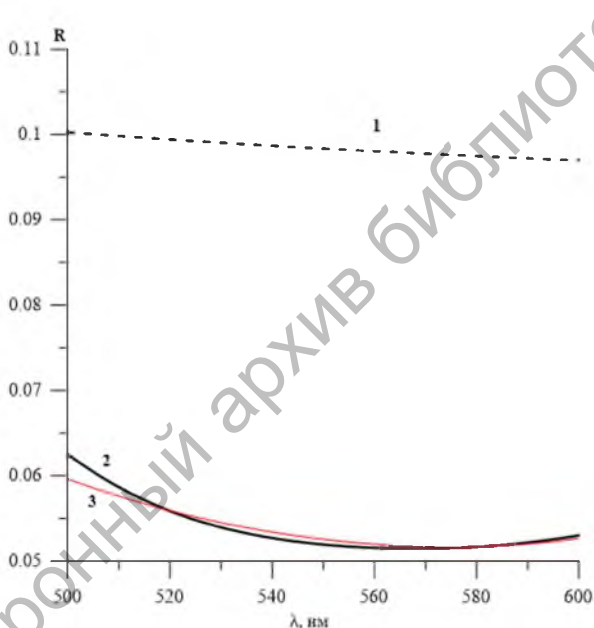
Расчитаны односторонние антибликовые покрытия в условиях частичной когерентности освещения. Математическая модель предполагает минимизацию целевой функции.

$$\langle R(d_k) \rangle = (mn)^{-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R(\lambda_i, \theta_j, d_k), \quad (1)$$

где d_k ($k=1, \dots, L$) – толщины слоев интерференционного покрытия; значения λ_i и θ_j равномерно распределены по диапазонам $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ и $[0, \theta_{\max}]$. Представленные в докладе результаты расчета минимумов функции (1) относятся к различным интерференционным покрытиям на пластине из поликарбоната (PC) миллиметровой толщины и получены для диапазона $600 \text{ нм} > \lambda > 500 \text{ нм}$ при $\theta_{\max} = 50^\circ$, $m \geq 11$, $n \geq 6$.

Минимумы $\langle R \rangle$ для односторонних покрытий с L – слоями и толщинами $D = \sum_{k=1}^L d_k$, нанесенных на PC пластине

Структура	L	D , нм	$\langle R \rangle_{\min}$
air/PC/MgF ₂ /ZrO ₂ /SiO ₂ /air	0	0	0.105
	1	105.6	0.0657
	2	105.4	0.0658
	3	381.0	0.0607
	4	145.1	0.0619
air/PC/SiO ₂ /ZrO ₂ /MgF ₂ /air	0	0	0.105
	1	98.9	0.0777
	2	98.8	0.0777
	3	386.0	0.0601
	4	143.3	0.0603



Минимизация спектральной при $\theta = 0$ (а) и угловой при $\lambda = 566$ нм (б) зависимостей отражательной способности антибликового покрытия при $L=3$: кривые 1 – PC пластине без покрытия, 2 – оптимальное одностороннее покрытие MgF₂/ZrO₂/SiO₂, 3 – SiO₂/ZrO₂/MgF₂

Зависимости $R_s(\lambda, \theta, d_k)$, $R_p(\lambda, \theta, d_k)$ рассчитывались по формулам, полученным в [4]. Минимизация $\langle R(d_k) \rangle$ осуществлялась методом покоординатного спуска. Дисперсионные зависимости для материалов SiO₂, ZrO₂, MgF₂ задавались формулами Селлмейера. Согласно таблице, $\langle R \rangle_{\min}$ резко уменьшается при увеличении L от 0 до 3 – 4. Дальнейшее увеличение числа слоев во всех трех рассмотренных типах интерференционных покрытий к ощутимому антибликовому эффекту не приводит, так как значение $\langle R \rangle_{\min}$

остается практически одинаковым и равным 0.06. Физическая интерпретация этого результата состоит в том, что оптимизация толщин слоев во всех рассмотренных интерференционных покрытиях приводит к практически полному просветлению одной границы РС пластины. Однако поскольку излучение, отраженное от этой границы пластины, и излучение, падающее затем на противоположную границу пластины, взаимно не когерентны, суммарный эффект отражения света от противоположной границы покрытия остается не скомпенсированным. Именно этот эффект определяет значение $\langle R \rangle_{\min} \approx 0.06$.

Литература

1. Константинова, Ю. А. Многослойные антибликовые покрытия с тонкими металлическими слоями / Ю. А. Константинова, Л. А. Губанова // Научно-технический вестник информационных технологий механики и оптики. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 375–378.
2. Адамсон, П. В. Антиотражающие поверхностные покрытия с непрерывно изменяющимся комплексным показателем преломления / П. В. Адамсон // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, № 22. – С. 50–57.
3. Pfeiffer, K. Wide-Angle Broadband Antireflection Coatings Prepared by Atomic Layer Deposition / K. Pfeiffer, L. Ghazaryan, U. Schulz, A. Szeghalmi // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2019. – Vol. 11. – P. 21887–21894.
4. Сотский, А. Б. Спектроскопия слоев на плоскопараллельных подложках / А. Б. Сотский, С. С. Михеев, Н. И. Стасков, Л. И. Сотская // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128, № 8. – С. 1133–1143.