

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ ОТ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

А. Г. Кудрявцева и В. В. Вермей

Исследовано влияние изменений показателей преломления и толщин слоев трехслойного ахроматического просветляющего покрытия на его спектральные характеристики.

Развитие и совершенствование оптических приборов часто сопровождается повышением требований к точности изготовления просветляющих покрытий. Литературные данные, касающиеся определения зависимости спектрального отражения от параметров слоев трехслойных покрытий, носят разобщенный характер или посвящены установлению общих зависимостей только для подложки с показателем преломления $n=1.51$ [1, 2].

Задачей настоящей работы явилось определение необходимой точности соотношения показателей преломления и толщин отдельных слоев при просветлении трехслойными покрытиями деталей из различных оптических материалов с показателями преломления, равными 1.45—1.80.

Предметом изучения служило нашедшее широкое практическое применение трехслойное покрытие, состоящее из слоев оптической толщиной $n_1h_1=n_3h_3=0.25\lambda$ и $n_2h_2=0.50\lambda$, где n_1h_1 — оптическая толщина слоя, граничащего с подложкой (внутренний слой), n_3h_3 — оптическая толщина внешнего и n_2h_2 — среднего слоев. Условное обозначение покрытия: $0.25\lambda-0.50\lambda-0.25\lambda$. У покрытий, снижающих отражение в видимой области спектра, λ составляет 480—500 нм.

Спектральные характеристики трехслойных просветляющих покрытий, приводимых в настоящей статье, получены путем расчета на ЭВМ по программе, составленной на основе рекуррентных формул Власова [3]. В основу расчета положены значения показателей преломления реально получаемых слоев окислов металлов ($n=1.45-2.30$) и фтористого магния.

Промышленное изготовление трехслойных покрытий производится химическим методом, поэтому основное внимание уделено изучению спектральных характеристик просветляющих покрытий с показателями преломления слоев 1.45—2.10, т. е. слоев, состоящих из двуокисей кремния ($n=1.45$), гафния ($n=1.95$), титана ($n=2.0-2.1$) и их смесей.

Изучение зависимости спектрального отражения трехслойных покрытий от показателей преломления слоев

В работах [1, 2] приведены данные о влиянии изменений значений показателя преломления внутреннего слоя на величину спектрального отражения R_λ трехслойных просветляющих покрытий только для подложек с показателем преломления, равным 1.51 и 1.52.

При практическом выполнении трехслойных покрытий на стеклах, отличающихся показателем преломления, возникла необходимость определения оптимальных значений показателя преломления внутреннего

слоя n_1 , обеспечивающего равномерное снижение отражения в заданной области спектра. С этой целью авторами произведены расчеты с вариацией величин n_1 для ряда значений показателей преломления подложек и найдено, что для получения отражения не более 0.5—0.8% значения n_1 трехслойного покрытия 0.25λ — 0.50λ — 0.25λ с $n_2=2.1$ и $n_3=1.45$ не должны выходить за пределы величин, указанных в табл. 1.

Таблица 1

n подложки	n_1
1.45	1.63—1.67
1.50	1.65—1.70
1.60	1.70—1.76
1.70	1.75—1.80
1.80	1.83—1.86

Замена показателей преломления среднего и наружного слоев при сохранении равномерности отражения приводит к необходимости определения оптимального значения n_1 для данного сочетания n_2 и n_3 . В табл. 2 для интервала длин волн 380—740 нм приведены значения коэффициента отражения (в %) трехслойных покрытий с различными значениями n_2 и n_3 на подложке с $n=1.50$ (n_1 — оптимально для каждого сочетания n_2 и n_3).

Таблица 2

λ , нм	$n_3 = 1.45$					
	$n_2 = 1.90$ $n_1 = 1.62$	$n_2 = 2.10$ $n_1 = 1.67$	$n_2 = 2.30$ $n_1 = 1.72$	$n_2 = 1.90$ $n_1 = 1.60$	$n_2 = 2.10$ $n_1 = 1.65$	$n_2 = 2.30$ $n_1 = 1.70$
380	0.90	1.04	1.75	0.99	1.76	3.00
400	0.68	0.33	0.44	0.33	0.50	1.05
420	0.77	0.21	0.15	0.20	0.12	0.33
440	0.86	0.27	0.13	0.22	0.05	0.10
460	0.86	0.33	0.13	0.27	0.05	0.03
480	0.85	0.35	0.11	0.29	0.06	0.01
500	0.84	0.36	0.10	0.30	0.06	0.003
520	0.85	0.35	0.11	0.29	0.06	0.01
540	0.86	0.34	0.12	0.28	0.05	0.02
560	0.86	0.31	0.13	0.25	0.05	0.05
580	0.85	0.27	0.13	0.22	0.05	0.10
600	0.82	0.23	0.13	0.20	0.07	0.20
620	0.78	0.21	0.16	0.20	0.13	0.35
640	0.72	0.22	0.23	0.23	0.25	0.58
660	0.69	0.29	0.37	0.30	0.43	0.92
680	0.69	0.44	0.61	0.42	0.70	1.36
700	0.73	0.66	0.98	0.60	1.04	1.92
720	0.82	0.87	1.44	0.84	1.48	2.60
740	0.98	1.20	2.04	1.14	2.00	3.37
Область спектра, где						
$R \leq 1\%$ { в нм в долях λ	375—745 0.74	380—730 0.70	390—700 0.62	380—730 0.70	390—690 0.60	400—660 0.52
$R \leq 0.5\%$ { в нм в долях λ	— —	390—690 0.60	400—670 0.54	390—690 0.60	400—670 0.54	410—630 0.44

На основании данных табл. 2 можно сделать следующее заключение: увеличение показателя преломления среднего слоя и уменьшение показателя преломления наружного слоя значительно понижает величину отражения; однако уменьшение величины отражения сопровождается сужением области спектра, для которой отражение принимает малые значения.

Определение зависимости спектрального отражения трехслойных покрытий от рассогласования оптических толщин слоев Расчет кривых спектрального отражения с отклонениями от номинальных значений оптических толщин был произведен для покрытий на подложках с показателями преломления $n=1.50$ ($n_1=1.65$, $n_2=2.10$)

и $n_3=1.45$) и $n=1.70$ ($n_1=1.80$, $n_2=2.10$ и $n_3=1.45$). Сравнение полученных значений отражения показало, что на подложках с различными показателями преломления одинаковые по величине отклонения в толщинах вызывают близкие (в пределах $\pm 0.2\%$) изменения отражения. Поэтому ограничимся рассмотрением характеристик покрытий на подложке с $n=1.50$.

На рис. 1 приведены кривые спектрального отражения трехслойных покрытий с отклонениями в толщине одного из слоев (кривые 2—4) и с отклонениями, разными по знаку в двух слоях (кривые 5—7). Величина отклонений составляет $\pm 0.04\lambda$, что соответствует ± 20 нм для покрытий, снижающих отражение в видимой области спектра. Значения оптических толщин слоев сведены в табл. 3.

Таблица 3

№ кривой на рис. 1	$n_1 h_1$		$n_2 h_2$		$n_3 h_3$	
	в долях λ	в нм	в долях λ	в нм	в долях λ	в нм
1	0.25	125	0.50	250	0.25	125
2a	0.29	145	0.50	250	0.25	125
2б	0.21	105	0.50	250	0.25	125
3a	0.25	125	0.54	270	0.25	125
3б	0.25	125	0.46	230	0.25	125
4a	0.25	125	0.50	250	0.25	125
4б	0.25	125	0.50	250	0.21	105
5a	0.29	145	0.46	230	0.25	125
5б	0.21	105	0.54	270	0.25	125
6a	0.25	125	0.54	270	0.21	105
6б	0.25	125	0.46	230	0.29	145
7a	0.29	145	0.50	250	0.21	105
7б	0.21	105	0.50	250	0.29	145

Анализируя кривые рис. 1, следует отметить, что отклонения от оптимальных толщин на $\pm 0.04\lambda$ во внутреннем или в среднем слоях увеличивают отражение до величин, не превосходящих 1% (при промышленном изготовлении не допускается в рабочей части спектра отражение от поверхности детали с трехслойным покрытием, превышающее 0.8—1.0%). Такие же по величине отклонения в наружном слое (кривые 4a и 4б) и разнозначные ошибки во внутреннем и среднем (кривые 5a и 5б), в среднем и наружном (кривые 6a и 6б), во внутреннем и наружном (кривые 7a и 7б) слоях вызывают увеличение отражения до величин, значительно превосходящих допустимые значения. Следовательно, подбор оптических толщин при обработке режимов трехслойного просветления должен производиться с точностью $\Delta nh = \pm (0.01 \div 0.02)\lambda$.

Заслуживающими внимания оказались результаты изучения влияния рассогласования толщин слоев покрытий, у которых показатель преломления внутреннего слоя имеет значение больше оптимального. Кривые рис. 2 представляют собой спектральное отражение покрытий, состоящих из слоев с показателями $n_1=1.75$, $n_2=2.10$ и $n_3=1.45$, показатель преломления подложки равен 1.50. (При n подложки 1.50 n_1 оптимально при значении 1.65). Значения оптических толщин каждого из покрытий приведены в табл. 3.

Кривые спектрального отражения рис. 2 свидетельствуют о том, что при отклонениях в оптических толщинах от оптимальных величин возможны случаи получения отражения с низкими значениями в сравнительно широкой области спектра (см. кривые 4a, 4б, 6б, 7б).

Меняя толщину покрытия, при этом сохраняя соотношение оптических толщин слоев, можно переместить указанные кривые в любую часть спектра. Так, уменьшив толщину слоев покрытия $0.25\lambda-0.50\lambda-0.29\lambda$ (см. кривую 4a рис. 2 и табл. 3) до значений $n_1 h_1=105$ нм, $n_2 h_2=210$ нм, $n_3 h_3=122$ нм и увеличив толщину слоев покрытия $0.25\lambda-0.50\lambda-0.21\lambda$

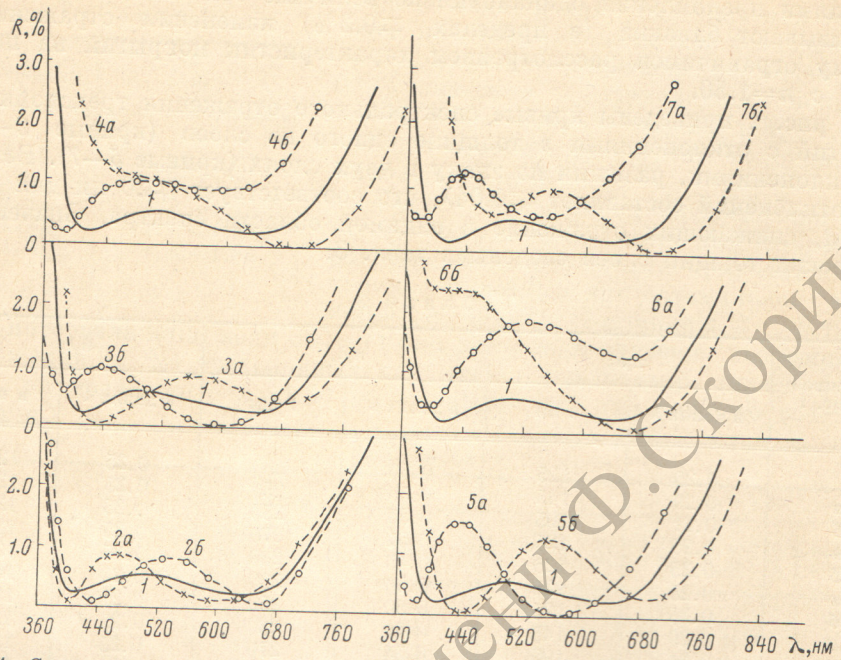


Рис. 1. Спектральное отражение трехслойных покрытий на подложке с показателем преломления 1.50 и показателями преломления слоев $n_1=1.65$, $n_2=2.10$, $n_3=1.45$. 1 — с оптимальной толщиной слоев и с отступлениями толщин: 2—4 — в одном из слоев, 5—7 — в двух слоях.

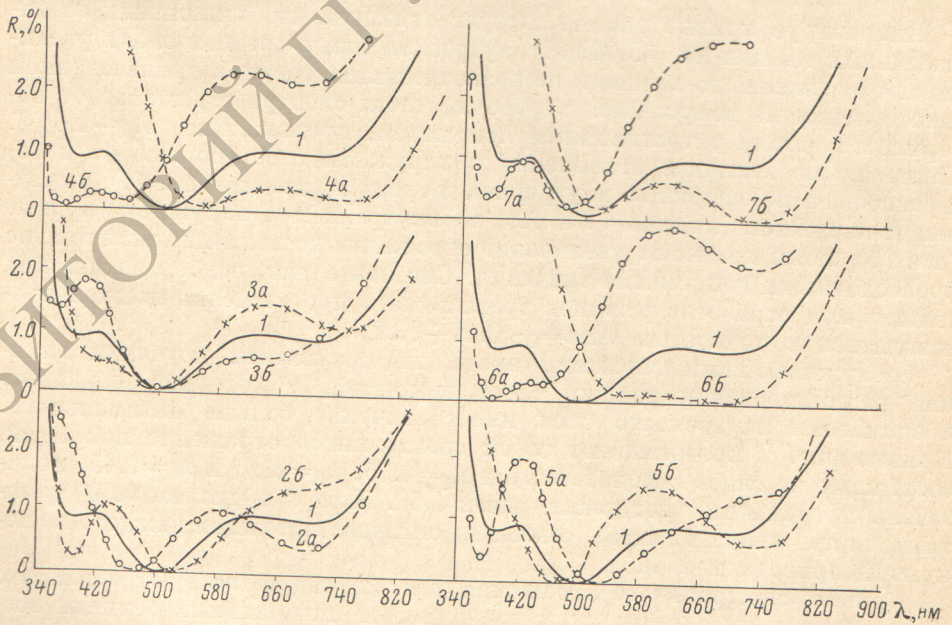


Рис. 2. Спектральное отражение трехслойных покрытий на подложке с показателем преломления 1.50 и показателями преломления слоев $n_1=1.75$, $n_2=2.10$, $n_3=1.45$. 1 — с оптимальной толщиной слоев и с отступлениями толщин: 2—4 — в одном из слоев, 5—7 — в двух слоях.

до значений $n_1h_1=160$ нм, $n_2h_2=320$ нм, $n_3h_3=134$ нм (см. кривую 4б на рис. 2 и табл. 3), были получены кривые с малыми значениями отражения в средней части видимого спектра. Однако, как показало сравнение, покрытия с показателем преломления внутреннего слоя больше оптимального значения и с оптической толщиной слоев $0.25\lambda - (0.46 \div 0.54)\lambda - (0.21 \div 0.29)\lambda$ снижают отражение в более узком интервале длин волн, чем покрытие с оптимальными значениями показателя преломления n_1 и оптических толщин слоев.

Следовательно, при практическом получении трехслойных просветляющих покрытий целесообразно подбирать показатель преломления внутреннего слоя в соответствии с показателем преломления детали и выбранного сочетания показателей преломления среднего и наружного слоев

Литература

- [1] Т. Н. Крылова. Интерференционные покрытия. Изд. «Машиностроение». Л., 1973.
- [2] Дж. Т. Рокс. Сб. «Физика тонких пленок», т. 2. Изд. «Мир», М., 1967.
- [3] И. В. Гребенщиков, А. Г. Власов, Б. С. Непорент. Просветление оптики. Гостехиздат. М.—Л., 1946.

Поступило в Редакцию 18 октября 1974 г.