

ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ  
ИЗ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
С ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ 1.7—2.0

А. Г. Кудрявцева, А. И. Свиридова и В. В. Веремей

Исследована зависимость спектрального отражения ахроматических двухслойных и трехслойных покрытий от показателей преломления первого слоя и просветляемых материалов. Из окислов титана, циркония, кремния и их смесей получены просветляющие покрытия на стеклах типа ТФ, ТБФ и СТК. Проведен анализ эффективности покрытий.

Ранее для стекол с показателем преломления более 1.7 считалось достаточным снижение отражения посредством однослойного просветления.

Расширение спектрального диапазона работы многих оптических систем, повышение требований к их светопропусканию и светорассеянию привело к необходимости применения для стекол с высоким показателем преломления более эффективных просветляющих покрытий.

Вопросам изучения спектральных характеристик и технологии получения просветляющих покрытий на стеклах с показателями преломления менее 1.7 посвящено множество статей. Наиболее систематично и полно эти вопросы освещены в работах [1-3], а в работе [4] приведены оптимальные значения показателей преломления слоев, при которых может быть достигнута наилучшая ахроматичность просветляющих покрытий для широкого диапазона показателей преломления подложек ( $n_{ст}=1.45-1.70$ ). Однако сведений, содержащих анализ эффективности ахроматических покрытий для стекол с  $n_{ст} > 1.70$ , в литературе не имеется.

В данной статье проведено сравнение спектрального отражения одно-, двух- и трехслойных покрытий для оптических материалов с показателями преломления 1.7—2.0. Определены оптимальные значения показателей преломления слоев, граничащих со стеклом.

Обсуждаемые спектральные характеристики покрытий получены расчетом и экспериментально. В основу расчета положены показатели преломления слоев двуокисей циркония, титана, кремния и их смесей, образуемых гидролизом из растворов хлорокиси циркония, тетраэтоксититана и тетраэтоксикремния с последующей термообработкой.

Значения показателей преломления внешнего и среднего слоев трехслойного покрытия, как правило, являются фиксированными, так как выбор веществ с высоким и низким значениями показателя преломления ограничен. Равномерность снижения отражения для стекол с различными показателями преломления достигается подбором показателя преломления внутреннего (первого) слоя.

Варьируя показатели преломления первого слоя  $n_1$ , расчетом определено спектральное отражение трех- и двухслойных ахроматических покрытий при показателях преломления стекла  $n_{ст}=1.7, 1.8, 1.9, 2.0$ . При расчете показатель преломления среднего слоя трехслойного покры-



Двухслойные покрытия

Трехслойные покрытия

$n_1$	Трехслойные покрытия				$\lambda_2/\lambda_1$	$n_1$	Двухслойные покрытия				$\lambda_2/\lambda_1$
	$R, \% \text{ для } \lambda, \text{ нм}$		$\lambda_1 - \lambda_2, \text{ нм}$	$n_1$			$R, \% \text{ для } \lambda, \text{ нм}$		$\lambda_1 - \lambda_2, \text{ нм}$		
	420	500					620	420		500	

$n_{\text{ст}} = 1.7$											
1.65	0.05	1.80	0.05	395-685	1.73	2.10	0.00	0.00	0.00	390-695	1.78
1.75	0.15	0.60	0.15	390-695	1.78						
1.80	0.40	0.25	0.40	390-695	1.78						
1.85	0.75	0.05	0.75	400-655							

$n_{\text{ст}} = 1.8$											
1.75	0.00	4.10	0.00	395-685	1.73	1.90	0.70	0.70	0.60	405-655	1.62
1.85	0.40	0.25	0.40	395-675	1.71	2.00	0.30	0.30	0.60	400-680	1.70
1.90	0.70	0.05	0.75	405-645	1.59	2.10	0.15	0.15	0.60	395-685	1.73

$n_{\text{ст}} = 1.9$											
1.85	0.15	0.50	0.15	395-675	1.71	2.30	0.30	0.30	0.20	405-655	1.62
1.87	0.20	0.35	0.25	395-670	1.69	2.20	0.25	0.25	0.20	405-665	1.64
1.92	0.50	0.10	0.55	405-655	1.62	2.10	0.40	0.40	0.20	405-665	1.64
1.94	0.65	0.03	0.70	405-645	1.59	2.00	0.65	0.65	0.20	405-650	1.60
1.96	0.80	0.02	0.85	415-635	1.53						
1.98	1.00	0.00	1.00	420-615	1.47						

$n_{\text{ст}} = 2.0$											
1.90	0.20	0.50	0.20	400-665	1.66	2.30	0.50	0.50	0.05	405-645	1.59
1.94	0.35	0.25	0.40	405-655	1.62	2.20	0.60	0.60	0.05	405-645	1.59
1.98	0.60	0.10	0.65	405-645	1.59	2.10	0.75	0.75	0.05	415-635	1.53
2.04	1.10	0.00	1.15	425-610	1.43						
2.08	1.50	0.05	1.55	435-585	1.34						



тия взят равным 2.1; показатель преломления внешних слоев изучаемых покрытий составляет 1.45.

Оптические толщины покрытий равны: трехслойного — 125, 250 и 125 нм (покрытие типа  $0.25 \lambda_0 - 0.5 \lambda_0 - 0.25 \lambda_0$ ), двухслойного — 250, 125 нм (покрытие типа  $0.5 \lambda_0 - 0.25 \lambda_0$ ). В таблице приведены для трех длин волн видимого спектра полученные при расчете значения отражения трехслойных и двухслойных ахроматических покрытий. Там же указан интервал длин волн ( $\lambda_1 - \lambda_2$ ) с отражением менее 1%. Для возможности

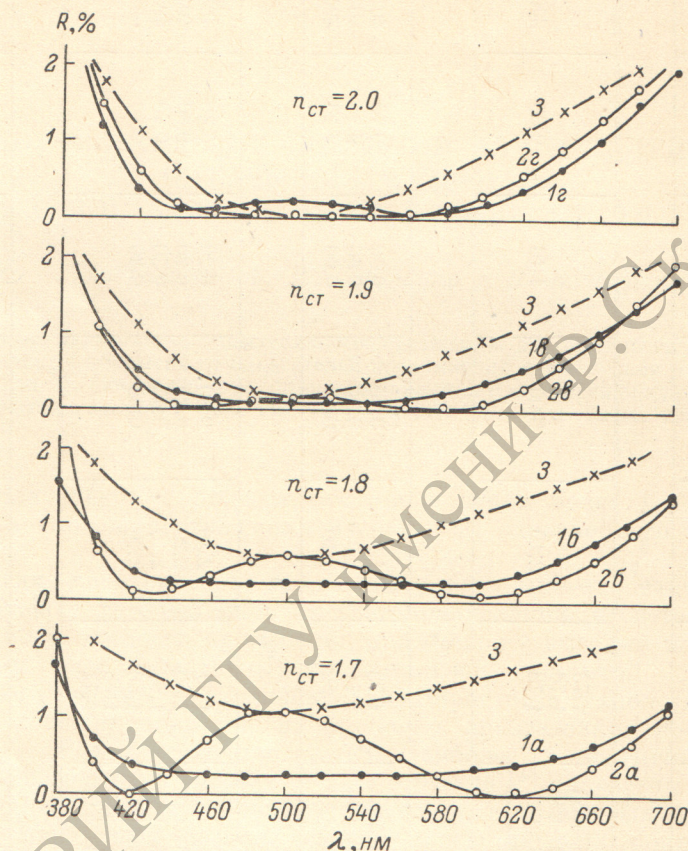


Рис. 1. Рассчитанное спектральное отражение.

Трехслойные покрытия типа  $0.25 \lambda_0 - 0.5 \lambda_0 - 0.25 \lambda_0$  с  $n_3 = 1.45$ ,  $n_2 = 2.1$ ; 1a —  $n_1 = 1.80$ , 1b —  $n_1 = 1.85$ , 1c —  $n_1 = 1.92$ , 1d —  $n_1 = 1.94$ ; двухслойные покрытия типа  $0.5 \lambda_0 - 0.25 \lambda_0$  с  $n_2 = 1.45$ ; 2a, 2b —  $n_1 = 2.1$ , 2c, 2d —  $n_1 = 2.2$ ; 3 — однослойных покрытий с  $n_1 = 1.45$ ,  $\lambda_0 = 500$  нм.

сопоставления покрытий, снижающих отражение в различных участках спектра, интервал длин волн также представлен соотношением  $\lambda_2/\lambda_1$ .

Кривые рис. 1 иллюстрируют спектральное отражение покрытий, у которых для каждого из значений стекла показатель преломления первого слоя оптимален, т. е. обеспечивает наилучшее по величине отражение. Однослойные покрытия, приведенные на том же рисунке, имеют показатель преломления слоя, равный 1.45.

Из данных таблицы и рисунка видно следующее:

1. Спектральное отражение трехслойного покрытия неодинаково зависит от показателей преломления стекла и первого слоя.

При  $n_{ст} = 1.7 - 1.8$  значение  $n_1$ , меньшее  $n_{ст}$  на 0.05, вызывает значительное повышение отражения в средней части спектра ( $R_{\lambda=500}$  составляет 1.1—1.8%). Равномерное отражение для указанных значений  $n_{ст}$  достигается при  $n_1$ , большем  $n_{ст}$  на 0.1—0.05.

При  $n_{ст} 1.9$  малое и достаточно равномерное отражение имеют покрытия с  $n_1$  как меньшем, так и большем  $n_{ст}$ . Однако при  $n_1 > n_{ст}$  незначительное



увеличение  $n_1$  сопровождается сужением интервала длин волн с отражением менее 1%.

При  $n_{ст}$  2.0 наилучшее спектральное отражение имеют покрытия с  $n_1=1.9-1.98$ , т. е. при  $n_1 < n_{ст}$ .

2. Двухслойное ахроматическое покрытие характеризуется наличием двух минимумов  $R_{min_1}$  и  $R_{min_2}$  и максимума  $R_{max}$  отражения в средней части рабочего диапазона длин волн. Величина  $R_{max}$  [1] определяется только показателями преломления стекла и внешнего слоя  $n_2$ :

$$R_{max} = \left( \frac{n_2^2 - n_{ст}}{n_2^2 + n_{ст}} \right)^2 \cdot 100\%.$$

При равных значениях  $n_2$   $R_{max}$  тем больше, чем меньше  $n_{ст}$  (см. отражение для  $\lambda=500$  нм).

Показатель преломления первого слоя влияет на величины  $R_{min_1}$  и  $R_{min_2}$ : с уменьшением  $n_1$  минимумы отражения исчезают, кривая спектрального отражения приобретает V-образный вид.

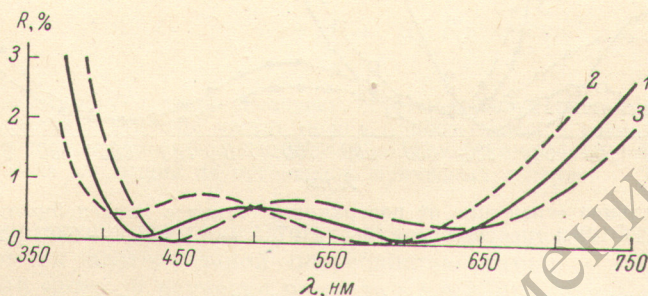


Рис. 2. Спектральное отражение двухслойных ахроматических покрытий с различной оптической толщиной слоев.

1 —  $n_1 h_1 = 0.50 \lambda_0 = 250$  нм,  $n_2 h_2 = 0.25 \lambda_0 = 125$  нм; 2 —  $n_1 h_1 = 0.46 \lambda_0 = 230$  нм,  $n_2 h_2 = 0.25 \lambda_0 = 125$  нм; 3 —  $n_1 h_1 = 0.54 \lambda_0 = 270$  нм,  $n_2 h_2 = 0.25 \lambda_0 = 125$  нм;  $n_{ст} = 1.8$ ,  $n_1 = 2.1$ ,  $n_2 = 1.45$ .

3. Однослойное покрытие для стекол изучаемого диапазона показателей преломления наименее эффективно. Двух- и трехслойные покрытия при  $n_{ст} > 1.8$  близки по величине отражения.

Спектральное отражение двух- и трехслойных покрытий зависит не только от значений показателей преломления слоев. Отклонение оптических толщин от оптимальных величин приводит к увеличению отражения.

В работе [4] показано, что для получения в рабочем интервале длин волн отражения не более 0.8—1.0% оптические толщины трехслойного покрытия должны быть выполнены с точностью  $\Delta n h = \pm(0.01-0.02) \lambda_0$ .

В результате произведенного с вариацией величин оптических толщин расчета спектрального отражения двухслойных ахроматических покрытий установлено, что отступления оптических толщин от оптимальных значений на  $\pm 0.04 \lambda_0$  увеличивают  $R_{max}$  на 0.2—0.3%. Кроме того, при  $n_1 h_1 < 0.5 \lambda_0$  происходит смещение  $R_{max}$  в коротковолновую область спектра, увеличение  $R_{min_1}$  и уменьшение  $R_{min_2}$ . При  $n_1 h_1 > 0.5 \lambda_0$  зависимость изменения отражения обратна вышеописанной (рис. 2).

Из оксидов титана, циркония, кремния и их смесей на стеклах СТК19 ( $n_p = 1.7440$ ), ТФ7 ( $n_p = 1.7280$ ), ТФ10 ( $n_p = 1.8060$ ), ТФ12 ( $n_p = 1.7849$ ), ТБФ3 ( $n_p = 1.7557$ ), ТБФ4 ( $n_p = 1.7786$ ), ТБФ5 ( $n_p = 1.8078$ ) получены ахроматические двухслойные и трехслойные покрытия, снижающие отражение в видимой и близкой ИК областях спектра.

Проведенный анализ спектрального отражения показал, что интервал длин волн с отражением менее 1% у экспериментальных покрытий меньше, чем у рассчитанных. Экспериментально полученные двух- и трехслойные покрытия, снижающие отражение от поверхности стекол с  $n_{ст} = 1.7-1.8$ ,



в видимой части спектра имеют  $\lambda_2/\lambda_1$  в среднем 1.54—1.62. У покрытий, работающих в области далее 470 нм,  $\lambda_2/\lambda_1$  составляет 1.60—1.66.

Расчеты показали, что возможными причинами, приводящими к сужению рабочего интервала длин волн, могут быть отступления в толщинах от номинальных значений и дисперсия показателей преломления стекла и слоев. Например, уменьшить интервал длин волн  $\lambda_2/\lambda_1$  до 1.6—1.7 могут ошибки в толщинах слоев трехслойных покрытий порядка  $\pm (0.02-0.04) \lambda_0$ .

Учет дисперсии стекла ТФ7 и слоя двуокиси титана при расчете спектрального отражения трехслойного покрытия дал следующие результаты:

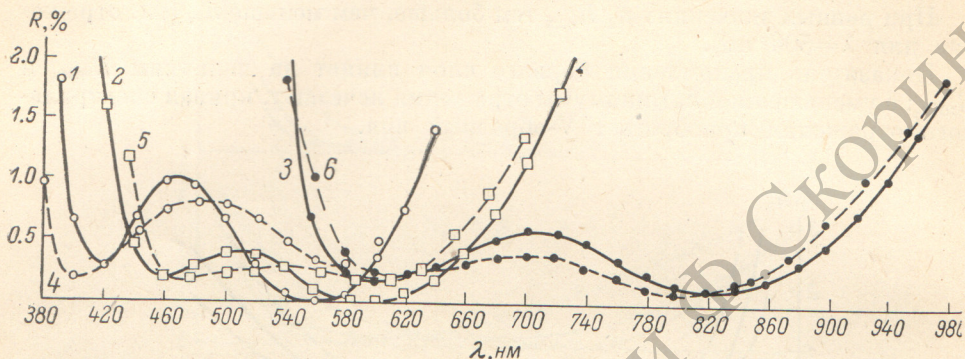


Рис. 3. Спектральное отражение от поверхности стекол с двухслойными (1 — ТФ7, 2 — ТБФ5, 3 — ТФ10) и трехслойными (4 — ТФ7, 5 — ТБФ5, 6 — ТФ10) покрытиями.

при  $n_{ст}=1.73$ ,  $n_1=1.8$ ,  $n_2=2.1$  и  $n_3=1.45$ , т. е. без учета дисперсии  $\lambda_2/\lambda_1=690/395=1.74$ ;

при  $n_2=f(\lambda)$  слоя двуокиси титана  $\lambda_2/\lambda_1=685/405=1.69$ ;

при  $n_{ст}=f(\lambda)$  стекла ТФ7 и  $n_2=f(\lambda)$  слоя двуокиси титана  $\lambda_2/\lambda_1=680/410=1.66$ .

Слои двуокисей циркония, гафния и кремния обладают дисперсией, не влияющей на спектральное отражение просветляющих покрытий в видимой и близкой ИК областях спектра.

Характерные кривые спектрального отражения двухслойных и трехслойных покрытий, состоящих из слоев двуокиси титана и двуокиси кремния представлены на рис. 3.

Экспериментальные данные, согласуясь с результатами расчета, свидетельствуют о том, что на стеклах с высокими показателями преломления эффективность трехслойных и двухслойных ахроматических покрытий практически одинакова. Вместе с тем изготовление двухслойных покрытий технологичнее из-за меньшего количества операций и легкости контроля толщин слоев. Это дает предпочтение в использовании двухслойных ахроматических покрытий.

#### Литература

- [1] Дж. Т. Кокс, Г. Тун. в сб.: Физика тонких пленок. «Мир», М., 1967.
- [2] Г. Н. Крылова. Интерференционные покрытия. «Машиностроение», Л., 1973.
- [3] Н. В. Суйковская. Получение тонких прозрачных пленок. «Химия», Л., 1971.
- [4] А. Г. Кудрявцева, В. В. Веремей. Опт. и спектр., 40, 841, 1976.

Поступило в Редакцию 12 июля 1977 г.