

## ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ПОВЫШЕННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

© 2005 г. Р. С. Соколова, канд. техн. наук; А. В. Михайлов, канд. техн. наук;  
Г. А. Муранова, канд. техн. наук

ВНЦ “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

Рассмотрены ахроматические просветляющие покрытия повышенной оптической эффективности с остаточным коэффициентом отражения  $\rho_{\text{ост}} = 0,1-0,3\%$  в областях спектра 3–5 и 8–12,5 мкм для кремния, германия и селенида цинка. Приведены конструкции таких покрытий различных составов на основе эксплуатационно-стойких тонкопленочных материалов, а также спектральные характеристики коэффициента отражения рассмотренных покрытий.

Коды OCIS: 310.1620.

Поступила в редакцию 07.04.2005.

Настоящее сообщение является развитием наших работ по созданию многослойных просветляющих покрытий высокой оптической эффективности для ИК области спектра [1]. В указанной работе представлены просветляющие покрытия с коэффициентом остаточного отражения 0,5–1,5% в областях спектра 3–5 и 8–12,5 мкм в зависимости от конструкции и состава для широкого круга ИК материалов (подложек). Эти покрытия нашли достаточно широкое использование в технологии оптического приборостроения. Однако с развитием ИК приборов и расширением их функциональности возрастают требования к их оптотехническим и другим параметрам, что часто приводит к многокомпонентности оптических систем. При переходе к многокомпонентным системам достаточно остро встает задача повышения оптической эффективности просветляющих покрытий (см. табл. 1).

Задача синтеза просветляющих покрытий повышенной оптической эффективности в ИК области спектра осложняется отсутствием эксплуатационно-прочного низкопреломляющего компонента ( $n = 1,2-1,35$ ). Развитие современных методов тонкопленочной технологии, направленных на повышение оптических и эксплуатационных параметров покрытий, например, таких, как ионное ассистирование, ионно-лучевые методы, несколько расширяет возможности синтеза. К существенным затруднениям при синтезе ИК просветляющих покрытий приводит

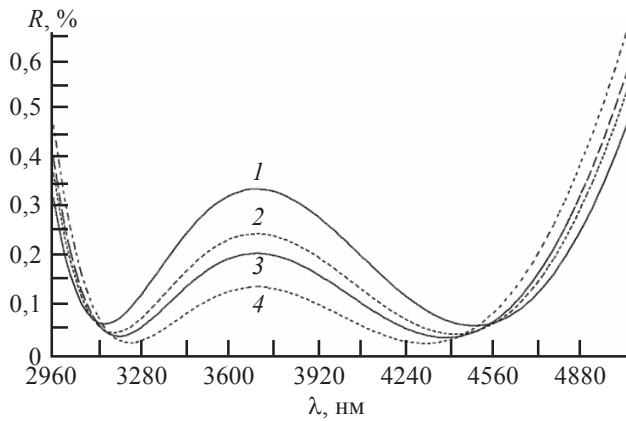
**Таблица 1.** Пропускание оптических систем с различным числом  $n$  компонентов в зависимости от величины остаточного отражения  $\rho_{\text{ост}}$  просветленной поверхности. (Без учета поглощения в подложке.)

Пропускание, %					
$\rho_{\text{ост}}, \%$ \ $n$	2	4	6	8	10
5	81	66	53	43	35
2	92	85	78	72	66
1	96	92	88	85	81
0,5	98	96	94	92	90
0,2	99	99	98	97	96

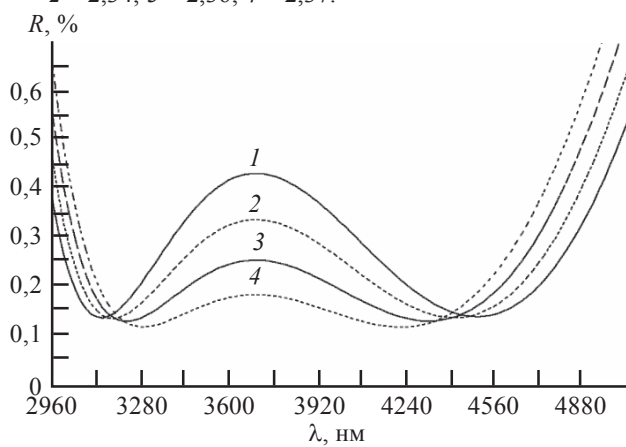
также крайне малый выбор устойчивых материалов с высоким и средним показателями преломления, особенно в диапазоне спектра далее 8–10 мкм. По этой причине часто интересные теоретические решения содержат слои с “нереальными” показателями преломления, т. е. не имеющими аналогов среди пригодных к использованию пленкообразующих материалов. Такие слои приходится заменять на трехслойные (или с большим числом слоев) системы, эквивалентные по показателю преломления и толщине [2], что приводит к усложнению конструкции покрытия и технологии его реализации.

Первые результаты наших работ в этом направлении использованы в [3], где приведен целый ряд покрытий с остаточным коэффициентом отражения менее 0,5% в областях спектра 3–5 и 8–12,5 мкм для нескольких наиболее распространенных материалов подложки.

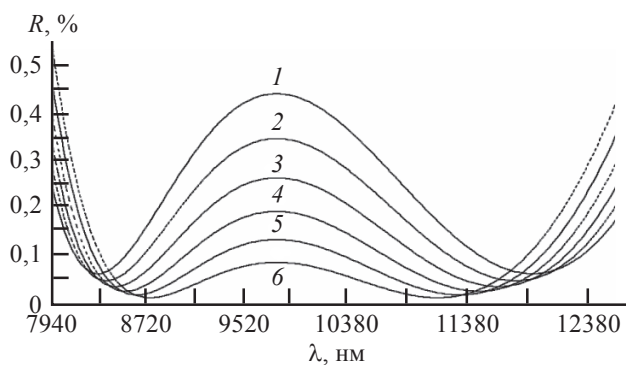
Настоящее исследование является продолжением этих работ. При синтезе покрытий, как и ранее, мы стремились находить наиболее простые технологичные решения на основе устойчивых тонкопленочных материалов. За основу были взяты двухслойные четвертьволновые покрытия ступенчатого типа с отступлением от нулевых решений. Проведена оптимизация таких конструкций для кремния и германия в области 3–5 мкм, а в области 8–12,5 мкм – для германия и селенида цинка. Оптимизация осуществлялась за счет варьирования показателя преломления нижнего высокопреломляющего слоя для нескольких значений “реальных” показателей преломления верхнего низкопреломляющего слоя. На рис. 1 и 2 в качестве примера приведены результаты проведенной оптимизации двухслойных четвертьволновых покрытий на кремнии в области 3–5 мкм при показателях преломления верхнего слоя 1,34 (рис. 1) и 1,5 (рис. 2). На рис. 3 и 4 приведены аналогичные результаты для германия в области 8–12,5 мкм при показателях преломления верхнего слоя 1,4 (рис. 3) и для селенида цинка при показателе преломления верхнего слоя 1,35 (рис. 4). Проведенная оптимизация позволила найти решения со средним



**Рис. 1.** Оптимизация двухслойных четвертьволновых просветляющих покрытий на кремнии в области 3–5 мкм при показателе преломления верхнего слоя  $n_1 = 1,34$  и различных  $n_2$ : 1 –  $n_2 = 2,32$ ; 2 – 2,34; 3 – 2,36; 4 – 2,37.

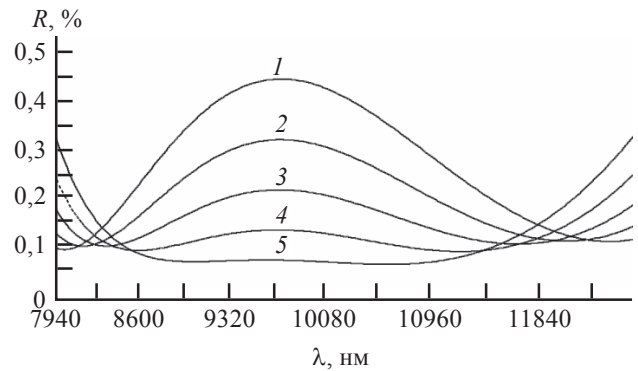


**Рис. 2.** Оптимизация двухслойных четвертьволновых просветляющих покрытий на кремнии в области 3–5 мкм при  $n_1 = 1,5$ : 1 –  $n_2 = 2,6$ ; 2 – 2,62; 3 – 2,64; 4 – 2,66.

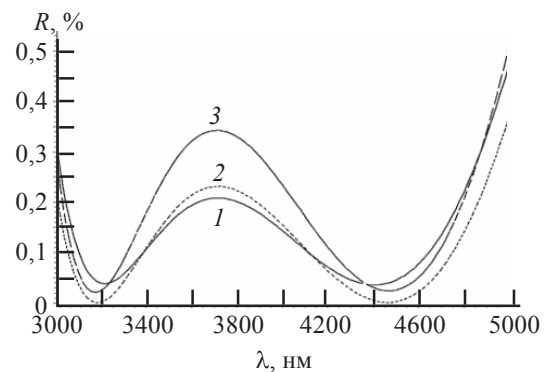


**Рис. 3.** Оптимизация двухслойных четвертьволновых просветляющих покрытий на германии в области 8–12,5 мкм при показателе преломления верхнего слоя  $n_1 = 1,4$ : 1 –  $n_2 = 2,62$ ; 2 – 2,64; 3 – 2,66; 4 – 2,68; 5 – 2,7; 6 – 2,72.

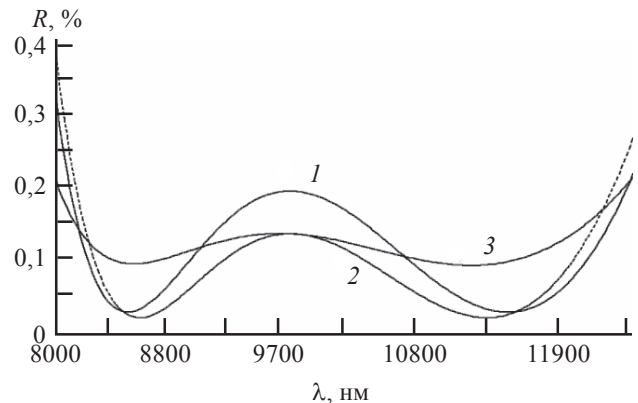
коэффициентом остаточного отражения  $\rho_{ост} = 0,1-0,3\%$  в рассмотренных спектральных областях при широком выборе показателей преломления составляющих слоев. Это существенно расширяет технологические возможности реализации покрытий и выбор покрытий для конструкторов-оптиков применительно к условиям эксплуатации прибора.



**Рис. 4.** Оптимизация двухслойных четвертьволновых просветляющих покрытий на селениде цинка в области 8–12,5 мкм при показателе преломления верхнего слоя  $n_1 = 1,35$ : 1 –  $n_2 = 1,96$ ; 2 – 1,98; 3 – 2,0; 4 – 2,02; 5 – 2,04.



**Рис. 5.** Спектральные кривые коэффициента отражения четвертьволновых просветляющих покрытий высокой оптической эффективности в области 3–5 мкм. 1 – на кремнии,  $\rho_{cp} = 0,145\%$ ; 2 – на кремнии,  $\rho_{cp} = 0,12\%$ ; 3 – на германии,  $\rho_{cp} = 0,18\%$ .



**Рис. 6.** Спектральные кривые коэффициента отражения четвертьволновых просветляющих покрытий высокой оптической эффективности в области 8–12,5 мкм. 1 – на германии,  $\rho_{cp} = 0,11\%$ ; 2 – на германии,  $\rho_{cp} = 0,09\%$ ; 3 – на селениде цинка,  $\rho_{cp} = 0,12\%$ .

В табл. 2 приведены несколько конструкций просветляющих покрытий на основе четвертьволновых слоев со средним коэффициентом остаточного отражения 0,15–0,3% в областях спектра 3–5 и 8–12,5 мкм. На рис. 5 и 6 в качестве примера приведены спектральные характеристики коэффициента отражения нескольких покрытий высокой оптической эффектив-

**Таблица 2.** Состав и оптические параметры просветляющих покрытий на основе четвертьволновых слоев

Область просветления, мкм	Материал подложки	Состав покрытия		$\rho_{\text{ср}}, \%$	$\lambda_2/\lambda_1$ ( $\rho_\lambda < 0,5\%$ )
		$n_1$	$n_2$		
3–5 ( $\lambda_0 = 3,6\text{--}3,8$ )	Кремний ( $n = 3,4$ )	1,34	2,37	0,14	1,70
		1,4	2,48	0,11	1,73
		1,5	2,59	0,23	1,73
	Германий ( $n = 4,0$ )	1,4	1,68	0,17	1,65
		1,5	2,82	0,20	1,72
		1,5	2,86	0,17	1,67
8–12,5 ( $\lambda_0 = 9,6\text{--}9,8$ )	Германий ( $n = 4,0$ )	1,4	2,66	0,14	>1,67
		1,4	2,70	0,09	>1,62
		1,5	2,84	0,14	>1,67
	Селенид цинка ( $n = 2,41$ )	1,35	2,00	0,15	>1,72
		1,35	2,04	0,11	>1,68
		1,4	2,07	0,24	1,64

**Таблица 3.** Состав и оптические параметры просветляющих покрытий на основе слоев эквивалентного показателя преломления

Область просветления, мкм	Материал подложки	Конструкция покрытия								$\rho_{\text{ср}}, \%$	$\lambda_2/\lambda_1$ ( $\rho_\lambda < 0,5\%$ )
		$n_1$	$n_1 h_1$	$n_2$	$n_2 h_2$	$n_3$	$n_3 h_3$	$n_4$	$n_4 h_4$		
3–5 ( $\lambda_0 = 3,6\text{--}3,8$ )	Кремний ( $n = 3,4$ )	1,4	0,282	4,0	0,0764	1,4	0,0597			0,14	1,65
		1,5	0,280	4,0	0,0825	1,5	0,0546			0,18	1,67
	Германий ( $n = 4,0$ )	1,5	0,279	4,0	0,0965	1,5	0,0518			0,2	1,67
		1,58	0,277	4,0	0,1045	1,58	0,0476			0,24	1,64
8–12,5 ( $\lambda_0 = 9,6\text{--}9,8$ )	Германий ( $n = 4,0$ )	1,4	0,280	4,0	0,0891	1,4	0,0563			0,24	1,57
		1,5	0,280	4,0	0,0975	1,5	0,0584			0,14	>1,61
	Селенид цинка ( $n = 2,41$ )	1,35	0,276	2,35	0,1082	1,35	0,0418	2,35	0,1182	0,08	>1,67
		1,4	0,264	2,16	0,1238	1,4	0,0181	2,16	0,1238	0,26	>1,67
		1,4	0,2608	2,16	0,1272	1,4	0,0107	2,16	0,1272	0,2	1,58

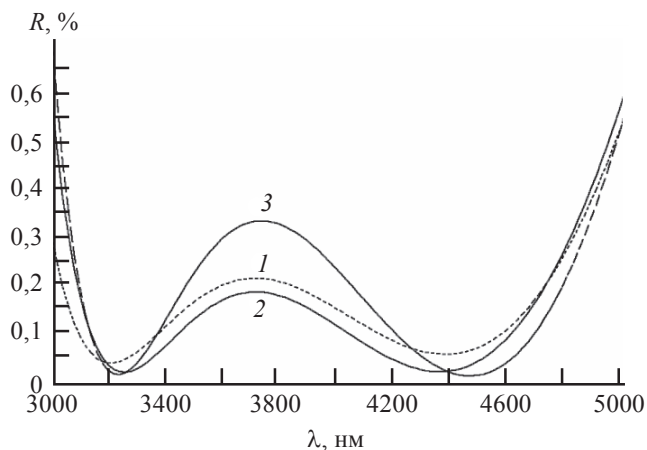
ности ( $\rho_{\text{отт}} < 0,2\%$ ) на кремнии, германии и селениде цинка на основе четвертьволновых слоев для областей спектра 3–5 (рис. 5) и 8–12,5 мкм (рис. 6).

Анализ результатов оптимизации четвертьволновых покрытий показывает, что целый ряд интересных решений содержит “нереальные” показатели преломления нижнего высокопреломляющего слоя. Такие слои нами были заменены на эквивалентные симметричные системы типа НВН или ВНВ, где Н – слои с низким показателем преломления, а В – слои с высоким показателем преломления. При этом рассматривались как однопериодные эквивалентные системы, состоящие из одной трехслойной системы, так и двухпериодные, содержащие две такие системы. Расчет эквивалентных двухпериодных систем может быть проведен с удовлетворительной погрешностью по приближенным формулам, приведенным в [4]. Однако состав эквивалентных однопериодных и двухпериодных систем мы рассчи-

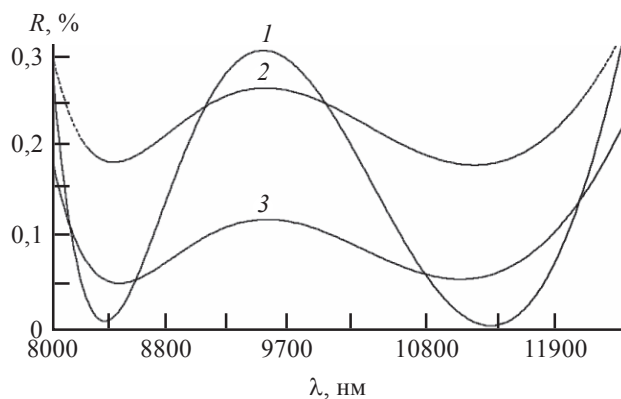
тывали по точным формулам с последующей машинной оптимизацией.

В табл. 3 приведены несколько конструкций просветляющих покрытий высокой оптической эффективности ( $\rho_{\text{отт}} < 0,3\%$ ) для 3–5 и 8–12,5 мкм на основе систем, содержащих слои эквивалентного показателя преломления. На рис. 7 приведены спектральные кривые коэффициента отражения просветляющих покрытий с использованием эквивалентных слоев с  $\rho_{\text{отт}} < 0,2\%$  в области 3–5 мкм для кремния (кривые 1, 2) и германия (кривая 3). На рис. 8 приведены спектральные характеристики аналогичных покрытий с  $\rho_{\text{отт}} < 0,2\%$  в области 8–12,5 мкм для германия (кривая 1) и селенида цинка (кривые 2, 3).

Использование слоев эквивалентного показателя преломления существенно расширяет выбор тонкопленочных материалов, устойчивых в эксплуатации. Однако такие конструкции чувствительны к



**Рис. 7.** Спектральные кривые коэффициента отражения просветляющих покрытий высокой оптической эффективности в области 3–5 мкм, содержащих слои эквивалентного показателя преломления. 1 – на кремнии,  $\rho_{\text{ср}} = 0,157\%$ ; 2 – на кремнии,  $\rho_{\text{ср}} = 0,145\%$ ; 3 – на германии,  $\rho_{\text{ср}} = 0,18\%$ .



**Рис. 8.** Спектральные кривые коэффициента отражения просветляющих покрытий высокой оптической эффективности в области 8–12,5 мкм, содержащих слои эквивалентного показателя преломления. 1 – на германии,  $\rho_{\text{ср}} = 0,13\%$ ; 2 – на селениде цинка,  $\rho_{\text{ср}} = 0,21\%$ ; 3 – на селениде цинка,  $\rho_{\text{ср}} = 0,088\%$ .

ошибкам в толщинах и показателях преломления составляющих слоев, допускаемым при их нанесении. Производство таких покрытий с высокой воспроизводимостью их оптических и эксплуатационных параметров предусматривает использование совершенного оборудования с автоматическим управлением процессами пленкообразования и надежным контролем оптической толщины слоев в процессе нанесения.

Нами были получены экспериментальные образцы двухслойных просветляющих покрытий различных конструкций и составов с  $\rho_{\text{ср}} \approx 0,2-0,3\%$  на отечественных установках типа ВУ-1А с использованием эксплуатационно-прочных тонкопленочных материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Первеев А.Ф., Гудкова К.В., Поплавский А.А., Соколова Р.С. и др. Развитие работ по оптическим покрытиям в ВНИЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова” // Оптический журнал. 1993. № 2 С. 4–19.
2. Berning J.A. Use of equivalent films in the design of infrared multilayer antireflection coatings // JOSA. 1962. V. 52. P. 431.
3. Гайнутдинов И.С. и др. Интерференционные покрытия оптического приборостроения. Казань: Изд. “Фэн”, 2002. 592 с.
4. Кокс Дж.Т., Хасс Г. Просветляющие покрытия для видимой и ИК областей спектра // Физика тонких пленок. Т. 2. М.: Мир, 1967. С. 186–242.