

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ОТРАЖАТЕЛИ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Ф. А. Королев, А. Ю. Клементьева, Т. Ф. Мещерякова
и И. А. Рамазина

В статье рассмотрены пути построения широкополосных отражателей различного типа. Описаны свойства экспериментальных образцов широкополосных отражателей для видимой и ультрафиолетовой областей спектра.

Введение

Многослойные диэлектрические отражатели, построенные на основе четвертьволновых пленок, могут быть осуществлены практически с любыми коэффициентами отражения в пределах от нескольких процентов почти до 100% при малых потерях света на поглощение. В настоящее время используются зеркала, содержащие как нечетное, так и четное число слоев, дающее промежуточные значения R_{\max} . Непрерывная последовательность R_{\max} легко достигается изменением толщины последнего слоя.

Однако заданная величина R_{\max} у четвертьволновых зеркал наблюдается лишь на определенном участке длин волн $\Delta\lambda$, вне которого покрытие практически не работает. Границы зоны отражения четвертьволнового зеркала определяются соотношением, полученным Дюфуром [1]

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{границ}}} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{2 \sqrt{\frac{n_H}{n_L}}}{\frac{n_H}{n_L} + 1},$$

где λ_0 — длина волны, соответствующая R_{\max} зеркала, для которой толщина всех слоев составляет $0.25\lambda_0$; n_H и n_L — показатели преломления чередующихся слоев с высоким и низким показателем преломления.

Из приведенного соотношения видно, что ширина области отражения определяется отношением $\frac{n_H}{n_L}$, увеличиваясь с ростом $\frac{n_H}{n_L}$ и не зависит от числа слоев. Отношение $\frac{n_H}{n_L}$ применяемых для изготовления зеркал веществ в большинстве случаев составляет величину порядка $2 \div 3$, а расстояние до границ зеркала не превышает $0.7 \div 0.8 \lambda_0$, как это иллюстрирует таблица. В таблице приводится ряд композиций многослойных четвертьволновых зеркал и соответствующие им положения границ зоны отражения в шкале $\frac{\lambda_0}{\lambda}$.

На практике очень часто возникает необходимость расширить зону отражения зеркал. Наиболее важными видами широкополосных систем для приборостроения являются зеркала полного отражения в определенной широкой области спектра (R близко к единице без наложения требо-

Тип покрытия	Границы области отражения четвертьволнового зеркала		Ширина области отражения в нм
	$\frac{\lambda_0}{\lambda_{нач.}}$	$\frac{\lambda_0}{\lambda_{конечн.}}$	
$PbF_2-Na_3AlF_6$ ($n=1.9$) ($n=1.36$)	0.88	1.12	270—340 ($\lambda_0=300$ нм)
$PbCl_2-MgF_2$ ($n=2.2$) ($n=1.38$)	0.86	1.14	300—400 ($\lambda_0=3400 \text{ \AA}$)
$ZnS-Na_3AlF_6$ ($n=2.33$) ($n=1.34$)	0.83	1.17	427—600 ($\lambda_0=500$ нм)
$Sb_2S_3-CaF_2$ ($n=2.5$) ($n=1.30$)	0.825	1.175	850—1210 ($\lambda_0=1000$ нм)
$Ge-Na_3AlF_6$ ($n=4.0$) ($n=1.34$)	0.67	1.33	1950—3900 ($\lambda_0=2.6$ мкм)

ваний на величину коэффициента пропускания T) и полупрозрачные зеркала с точно заданными величинами R и T в зоне отражения.

Необходимо заметить, что задачи на построение широкополосных отражателей различного типа неравноценны по сложности. Система полного отражения осуществляется сравнительно простыми путями, тогда как вторая система требует проведения длительных расчетов и сложнее в изготовлении.

Расчеты спектральных характеристик многослойных непоглощающих систем выполнялись нами на основе матричного уравнения с помощью ЭВМ по ранее описанной методике [2].

С целью отыскания путей построения широкополосных отражателей авторами было исследовано большое число систем симметричного и несимметричного вида. Было показано, что покрытия симметричного вида не позволяют получить гладкую кривую отражения. В данной статье описаны только те виды покрытий, которые позволяют осуществить широкополосные отражатели.

Многослойные системы полного отражения

Для построения широкополосных зеркал полного отражения ($R \approx 100\%$) были изучены 2 типа покрытий:

- 1) системы, содержащие чередующиеся слои двух диэлектриков (с высоким и низким показателями преломления), убывающие по толщине, и
- 2) системы, представляющие наложение нескольких четвертьволновых зеркал, нанесенных последовательно на одну подложку.

Многослойные широкополосные отражатели, состоящие из чередующихся слоев, убывающих по толщине. Теоретические расчеты многослойных систем с убывающими по толщине покрытиями, выполненные для различных сочетаний веществ ($PbF_2-Na_3AlF_6$, $ZnS-Na_3AlF_6$, $Sb_2S_3-CaF_2$ и др.) показали, что на этой основе могут быть осуществлены сколь угодно широкие отражатели с высоким значением $R \approx 1$. Многослойная система такого типа состоит из чередующихся слоев с низким и высоким показателями преломления, начинается с четвертьволнового слоя ($n\lambda = 0.25\lambda_0$); толщина последующих слоев скачкообразно убывает, например, по закону арифметической или геометрической прогрессии [3]. Основным моментом построения является требование малости изменений толщины от слоя к слою. Эти изменения должны быть тем меньше, чем ближе показатели прелом-

ления образующих покрытие веществ. Так, для веществ с $\frac{n_H}{n_L} = 1.4 \div 1.8$, работающих в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, необходимо брать значения знаменателя геометрической прогрессии q в интервале от 0.98 до 1 или значения разности d арифметической прогрессии от 0 до $0.005\lambda_0$. Для веществ инфракрасной области спектра, где $\frac{n_H}{n_L} = 2 \div 3$,

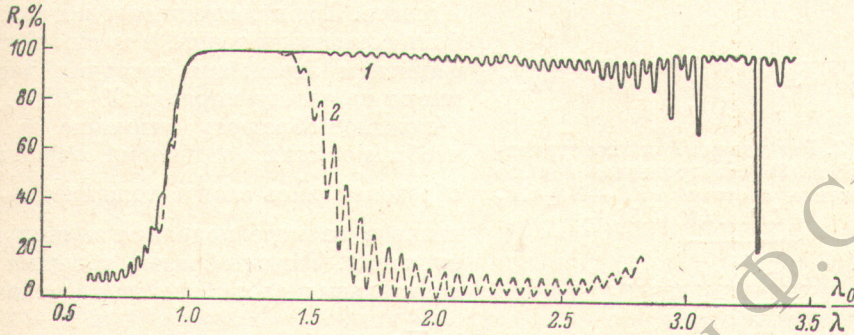


Рис. 1. Спектральные кривые отражения широкополосных покрытий PbF_2 — Na_3AlF_6 .

1 — система H (0.992L) (0.985H) ... (0.224L) (0.216H) D; 2 — система H (0.992L) (0.985H) ... (0.680L) (0.672H) D.

подходящими являются значения $q \approx 0.9 - 0.95$ и $d \sim 0.01 \lambda_0 - 0.02 \lambda_0$. Если взять более грубые изменения слоев, то зона высокого отражения может не образоваться, например для $q = 0.8$ в случае системы PbF_2 — Na_3AlF_6 .

При построении широкополосных систем авторы пользовались также парными покрытиями, когда оптическая толщина изменялась скачком через 2 слоя. Спектральная кривая отражения такой системы испытывает незначительный сдвиг в сторону больших длин волн.

На рис. 1 приводятся расчетные спектральные кривые для покрытий PbF_2 — Na_3AlF_6 , построенных по схеме — $0.250\lambda_0 - 0.248\lambda_0 - 0.246\lambda_0 \dots$. Кривая 1 относится к системе, содержащей 99 слоев; зеркало отражает почти полностью в ультрафиолетовой и видимой областях спектра до 500 нм. Кривая 2 на рис. 1 относится к покрытию такого же типа с меньшим числом слоев, равным 41; область отражения зеркала значительно уже. Теоретические (кривая 1) и экспериментальные (кривая 2) данные для покрытия PbF_2 — Na_3AlF_6 типа $0.25\lambda_0 - 0.250\lambda_0 - 0.245\lambda_0 - 0.245\lambda_0 \dots - 0.190\lambda_0 - 0.190\lambda_0$ приводятся на рис. 2. Система с убывающими по толщине слоями (рис. 2) дает возможность в 1.5 раза расширить область отражения ультрафиолетового зеркала (20-слойного) при увеличении числа слоев до 26.

Из рассмотрения рис. 1 и 2 следует, что область отражения зеркал хорошо регулируется числом слоев и что расширение области отражения в несколько раз связано с нанесением большого числа слоев $\sim 60 - 100$.

Многослойные широкополосные зеркала, получаемые наложением четвертьволновых

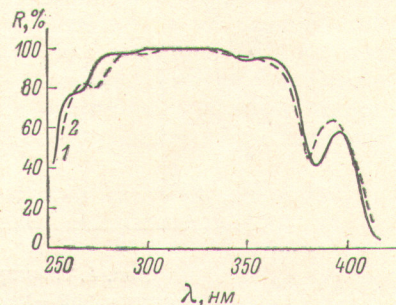


Рис. 2. Экспериментальная (1) и расчетная (2) кривые отражения системы PbF_2 — Na_3AlF_6 (0.76H) (0.76L) (0.78H) (0.78L) ... LHD.

зеркал. Другим способом осуществления зеркал полного отражения является наложение четвертьволновых зеркал, границы которых несколько перекрываются [4]. Число слоев каждого зеркала берется таким, чтобы коэффициент отражения R был близок к единице. Например, для систем $ZnS-MgF_2$ берется 13—15 слоев, для покрытий $PbF_2-Na_3AlF_6$ — 19—20 слоев. При наложении зеркал должны быть совмещены точки, в которых коэффициенты отражения соседних зеркал имеют величину порядка 90—95%. Необходимо обращать внимание на то, чтобы в местах соединения зеркал не образовывались слои с толщиной $\sim \frac{\lambda}{2}$, иначе в спектре появляются пики пропускания. Таким образом, толщина соединительных слоев должна составлять $\leq \frac{\lambda}{4}$.

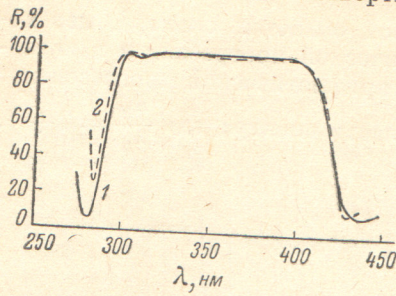


Рис. 3. Расчетная (1) и экспериментальная (2) спектральные кривые отражения системы $PbF_2-Na_3AlF_6$ $HLH \dots LH$ (0.5L) — $\underbrace{\quad}_{18}$ $\underbrace{\quad}_{21}$ $(0.9H) (0.9L) \dots (0.9H)$.

Область отражения зеркала, полученного таким путем, теоретически может быть сколь угодно широкой; на практике она лимитируется механической прочностью покрытий.

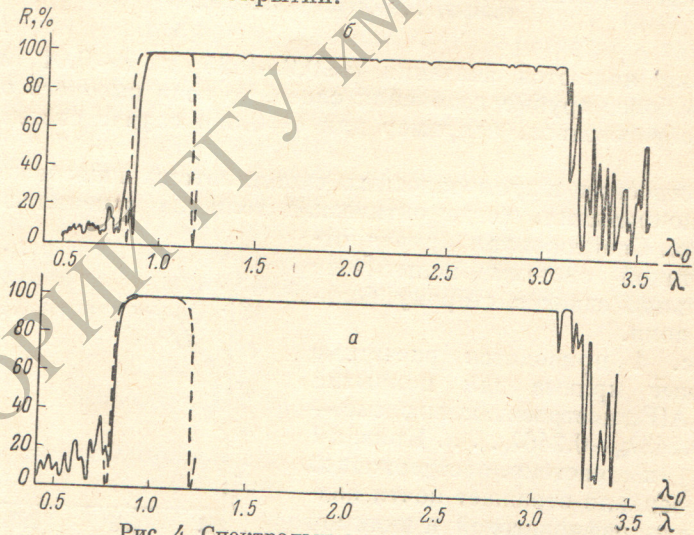


Рис. 4. Спектральные кривые отражения.

a — системы $PbF_2-Na_3AlF_6$ $HL \dots LH$ $\underbrace{\quad}_{20}$ $\underbrace{\quad}_{20}$ $(0.8H) (0.8L) \dots (0.8L)$
 $\underbrace{\quad}_{20}$ $\underbrace{\quad}_{20}$ $\underbrace{\quad}_{21}$ $(0.66H) (0.66L) \dots (0.66L) (0.54H) (0.54L) \dots (0.54L) (0.44H) (0.44L) \dots (0.44H) D$
 (сплошная линия), системы — $HLH \dots LH$ (штрихи); b — системы $ZnS-Na_3AlF_6$ $HL \dots LH$ $\underbrace{\quad}_{13}$ $\underbrace{\quad}_{13}$ $\underbrace{\quad}_{13}$ $(0.78L) (0.78H) \dots (0.78L) (0.61H) (0.61L) \dots (0.61H)$
 $\underbrace{\quad}_{13}$ $\underbrace{\quad}_{13}$ $\underbrace{\quad}_{13}$ $(0.47L) (0.47H) \dots (0.47L) (0.37H) (0.37L) \dots (0.37H) D$ (сплошная линия); системы $HL \dots LH$ — штриховая линия.

В настоящее время достаточно прочными могут быть получены покрытия для видимой и ультрафиолетовой областей спектра, содержащие до

50—100 слоев толщиной $\sim \frac{\lambda}{4}$. В инфракрасной области спектра число слоев снижается до 10—30 слоев.

Рис. 3 иллюстрирует случай наложения двух диэлектрических зеркал с оптической толщиной слоев $0.25\lambda_0$ и $0.225\lambda_0$ через слой криолита толщиной $0.125\lambda_0$. Система работает в ультрафиолетовой области спектра. Расчетная (1) и экспериментальная (2) спектральные кривые отражения хорошо согласуются.

Дальнейшие возможности расширения области отражения зеркал показаны на рис. 4, где *a* соответствует наложению 5 зеркал $\text{ZnS}-\text{Na}_3\text{AlF}_6$ с общим числом слоев, равным 65 и *b* соответствует наложению 5 зеркал $\text{PbF}_2-\text{Na}_3\text{AlF}_6$ с общим числом слоев 119. Кривые отражения обычных четвертьволновых зеркал приведены на рис. 4 штриховыми линиями для сравнения. Зеркало *a* отражает в видимой и близкой инфракрасной области спектра до 1500 нм, зеркало *b* перекрывает ультрафиолетовую и видимую области спектра.

Сравнивая два способа построения широкополосных зеркал высокого отражения, следует отметить, что число слоев в обоих случаях относительно велико. Практически легче осуществляются зеркала, полученные наложением четвертьволновых, так как методика их контроля в процессе нанесения слоев почти не отличается от методики получения четвертьволновых покрытий.

Широкополосные отражатели с заданным значением R

Осуществление широкополосных зеркал, имеющих заданные, промежуточные значения $R \neq 100\%$ в определенной области спектра, является наиболее трудоемкой задачей как в области проведения расчетов, так и в экспериментальном получении образцов.

Задача решается наиболее эффективно на основе сложных неравнотолщинных покрытий, включающих слои с различными показателями преломления [5].

Одним из методов расчета таких систем является варьирование слоев по толщине и показателю преломления для отыскания состава системы (метод Эльснер). Метод заключается в том, что с помощью ЭВМ вычисляются спектральные кривые пропускания (отражения) систем с различным набором параметров $n_i h_i$ и n_i и сравниваются с заданным габаритом. Машина отбирает те варианты состава системы, которые удовлетворяют заданному габариту.

Авторы пользовались методом варьирования слоев по толщине, что позволило рассчитать ряд широкополосных отражателей для ультрафиолетовой и видимой областей спектра.

На рис. 5 приводится теоретическая (1) и экспериментальная (2) кривые отражения широкополосного ультрафиолетового зеркала с коэффициентов отражения около 90—92%. Система выполнена на основе слоев $\text{PbF}_2-\text{Na}_3\text{AlF}_6$ и содержит 21 слой. Область отражения зеркала шире в 1,5 раза по сравнению со случаем четвертьволнового. На границах области отражения имеется расхождение расчетных и экспериментальных данных, связанное, очевидно, с тем, что в расчетах не учитывалась дисперсия показателей преломления веществ.

Широкополосные системы для видимой области спектра осуществлялись авторами на основе расчетных данных, приведенных в работе [6]. Рис. 6 представляет спектральные кривые отражения (1 — теоретическая, 2 — экспериментальная) 15-слойного отражателя на основе слоев $\text{ZnS}-\text{Na}_3\text{AlF}_6$. Система обеспечивает величину коэффициента отражения в видимой области спектра порядка 95%. Данная система, как показано путем расчета и экспериментально (3), может быть упрощена без заметного ухудшения характеристик.

Авторы также получили ряд экспериментальных образцов широкополосных зеркал для видимой области спектра, предложенных Эльснер [7]. Лучшие результаты показали 11-слойная система $ZnS-Na_3AlF_6$, имеющая следующий состав: $0.25\lambda_0 - 1.25\lambda_0 - 1.25\lambda_0 - \underbrace{0.25\lambda_0 \dots 0.25\lambda_0}_5 - 0.5\lambda_0 - 0.25\lambda_0 - 0.25\lambda_0$. Ширина области отражения экспериментальных обра-

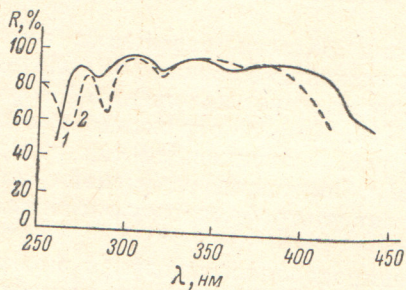


Рис. 5. Расчетная (1) и экспериментальная (2) кривые отражения системы $PbF_2-Na_3AlF_6$ HLHLH.
 ·(0.997L) (0.890H) (1.01L) (0.94H).
 ·(0.84L) (0.84H) (0.788L) (0.788H).
 ·(0.76L) (0.74H) (0.74L) ... (0.74H) D.

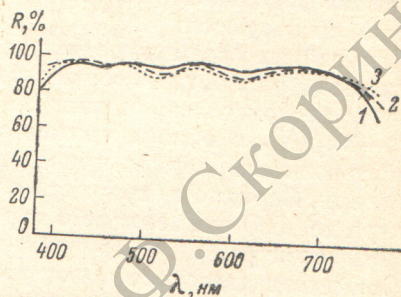


Рис. 6. Спектральные кривые отражения (1 и 2) системы $ZnS-Na_3AlF_6$
 (0.6H) (0.6L) (0.6H) (0.629L) (0.673H).
 ·(0.673L) (0.753H) (0.753L) (0.908H).
 ·(1.016L) (0.832H) (0.965L) HLHD и системы (0.6H) (0.6L) (0.6H) (0.64L).
 ·(0.68H) (0.68L) (0.76H) (0.76L) (0.9H).
 ·(1.02L) (0.84H) (0.96L) HLHD (3).

цов данного состава простирается от 400 до 730 нм, среднее значение коэффициента отражения лежит вблизи 92%. Последняя система несколько уступает варианту (рис. 6) в отношении величины отклонений R от среднего значения ($\delta R \approx 7 \div 8\%$), однако она имеет большое преимущество в простоте изготовления, так как толщины всех слоев в этом случае кратны $\frac{\lambda}{4}$ от фиксированной длины волн.

Проведенные исследования позволили выявить структуру и осуществить практически ряд многослойных диэлектрических систем с широкой областью отражения.

В заключение авторы благодарят за участие в расчетах систем А. И. Дмитриева.

Литература

- [1] С. Dufour. J. Phys. Rad., 11, 321, 1950.
- [2] Ф. А. Королев, А. Ю. Клементьев, Т. Ф. Мещерякова, И. А. Рамазина. Опт. и спектр., 27, 303, 1969.
- [3] O. S. Heavens. H. M. Liddel. Appl. Opt., 5, 373, 1966.
- [4] A. F. Turner, P. W. Baumeister. Appl. Opt., 5, 69, 1966.
- [5] I. A. Dobrowolsky. Appl. Opt., 4, 937, 1965.
- [6] P. W. Baumeister, I. M. Stone. J. Opt. Soc. Am., 46, 228, 1956.
- [7] З. Н. Эльснер. Опт. и спектр., 17, 446, 1964.

Поступило в Редакцию 10 октября 1969 г.