

# ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

УДК 535.321: 535.391.4.015.9

## СПЕКТРОДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ В ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ВИДИМОЙ И ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТЕЙ СПЕКТРА

© 2009 г. **Е. Н. Котликов\***, доктор физ.-мат. наук; **Е. В. Хонинева\***, канд. физ.-мат. наук;  
**В. Н. Прокашев\***, канд. техн. наук; **А. Н. Тропин\*\***, канд. физ.-мат. наук

\* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург

\*\* НИИ “Гириконд”, Санкт-Петербург

E-mail: ekotlikov@mail.ru, prokashev@aanet.ru, tropal@mail.ru

В работе описаны примеры синтеза и изготовления оптических покрытий, работающих в средней инфракрасной области и видимом диапазоне одновременно. В частности, речь идет о реализации задачи разделения излучений  $\text{CO}_2$  и He-Ne-лазеров с помощью интерференционных покрытий, пропускающих (или отражающих) излучение  $\text{CO}_2$ -лазера и одновременно отражающих (или пропускающих) пилотное излучение видимого диапазона, в том числе излучение He-Ne-лазера. На основе легированных пленок  $\text{BaF}_2$  рассмотрены структуры, отражающие видимый диапазон и одновременно работающие как просветляющие покрытия в ИК диапазоне спектра. Использование металлодиэлектрических покрытий позволяет реализовать структуры, отражающие излучение ИК диапазона и одновременно пропускающие излучение видимого и ближнего ИК диапазонов спектра. Приведены примеры синтеза и практической реализации подобного рода покрытий.

*Ключевые слова:* синтез оптических покрытий, интерференционные покрытия, диэлектрические пленки, металлодиэлектрические покрытия.

Коды OCIS: 310.3840

Поступила в редакцию 28.04.2009

### Введение

Для реализации интерференционных покрытий, работающих одновременно в видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра, имеются два подхода. Во-первых, использование диэлектрических пленок с различными коэффициентами преломления и малыми потерями в диапазоне спектра от 0,5 до 12 мкм. Во-вторых, синтез и реализация металлодиэлектрических покрытий на основе пленок серебра или золота.

Перспективные для первого подхода пленки сульфида и селенида цинка прозрачны в диапазоне спектра от 0,7 до 15 мкм практически при любой толщине. Пленки с малым коэффициентом преломления: фториды бария, кальция, стронция, свинца, – при суммарных оптических толщинах более 3–5 мкм в многослойных покрытиях малопрозрачны в видимой части спектра из-за потерь на рассеяние [1, 2]. Для получения

интерференционных покрытий для видимого и ИК диапазонов спектра в настоящей работе проведены исследования показателя преломления  $n_f$  и относительной плотности  $Q$  легированных пленок  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$  и  $\text{PbF}_2$  при вариации концентрации и состава легирующих примесей. Также проводились исследования влияния легирующих добавок на напряжения в пленках и интерференционных покрытиях для ИК диапазона спектра. Наиболее детально были исследованы свойства пленок фторида бария. С применением легированных пленок фторидов и сульфоселенидов цинка синтезированы, изготовлены и исследованы диэлектрические покрытия на подложках из селенида цинка, работающие в видимом и ИК диапазонах спектра одновременно.

В работе описан ряд синтезированных металлодиэлектрических покрытий на подложках из лейкосапфира, представляющих интерференционные фильтры видимого диапазона спектра, ко-

торые одновременно являются высокоотражающими зеркалами в средней ИК области спектра.

### Измерение оптических констант легированных пленок фторида бария

Для определения показателя преломления легированных пленок фторида бария использовалась методика, базирующаяся на измерении пропускания пленки на прозрачной подложке в вакууме сразу после напыления. Для возникновения контрастной интерференционной картины в системе “подложка–пленка ВаF<sub>2</sub>” в качестве подложек использовались кремниевые плоскопараллельные пластинки с  $n_s = 3,5$ . В эксперименте необходимо было нанести пленку оптической толщиной  $\lambda_0/4$  для определения показателя преломления напыляемого слоя, при этом референтная длина волны  $\lambda_0$  выбиралась равной 1,2 мкм.

Значение пропускания в максимуме  $T_{\max}$ , соответствующем нанесенной четвертьволновой пленке, можно использовать для вычисления показателей преломления одиночной пленки  $n_f$  в области с минимальным поглощением с помощью следующего соотношения:

$$n_f = \sqrt{\left(-A - \sqrt{A^2 - B^2}\right) / 2T_{\max}}, \quad (1)$$

где  $A = T_{\max}n_s^2 - 2n_s^2 + T_{\max} - 2$ ,  $B = 2T_{\max}n_s$ , а  $T_{\max}$  нормируется на пропускание подложки без напыленного слоя. Пропускание чистой непоглощающей подложки с учетом многократного отражения от параллельных граней вычисляется как

$$T_0 = 2n_s / (n_s^2 + 1). \quad (2)$$

Выражение (1) также учитывает многократное отражение света в подложке.

Пропускание  $T_{\max}$  определялось с помощью фотометрической системы контроля. Точность определения пропускания подложки с нанесенными пленками  $\delta T$  была менее 0,5%. Расчеты показывают, что, если показатель преломления пленки  $n_f$  находится в пределах от 1,3 до 1,8, то при отсутствии поглощения в пленках его погрешность измерения  $\delta n_f$  равна 0,015. Таким образом, точность измерений показателя преломления данным методом высока и сравнима с точностью измерения показателей преломления другими методами, например, эллипсометрическими, спектрофотометрическими и проч.

Относительная плотность пленки  $Q$  определяется отношением плотности пленки  $\rho_f$  к плот-

ности массивного образца  $\rho_m$ . Относительная плотность (коэффициент упаковки, коэффициент заполнения) связана с показателем преломления массивного образца  $n_m$  и пленки  $n_f$  соотношением [3]

$$Q = [(n_f^2 - 1)/(n_f^2 + 2)][(n_m^2 + 2)/(n_m^2 - 1)]. \quad (3)$$

Для напыления пленок и покрытий использовались установка типа ВУ-2М и стандартная методика [4]. Во время напыления температура подложек  $t_S$  определялась термопарой, укрепленной на оправе, с точностью до  $\pm 3$  °С. Для нагрева оправы и подложек использовалась стандартная система нагрева вакуумной установки. Разброс температур, обусловленный периодическим включением системы нагрева, составлял  $\pm 5$  °С, т. е. точность фиксации  $t_S$  во время напыления составляла  $\pm 5$  °С. Контроль толщины напыляемых пленок осуществлялся фотометрической системой на длине волны 1,2 мкм.

В ходе изготовления пленок оценивался их коэффициент аккомодации (прилипания) по количеству испаренного вещества и по скорости роста пленки при фиксированной мощности, рассеиваемой тиглем с напыляемым веществом. Для чистых ВаF<sub>2</sub>, СаF<sub>2</sub> и PbF<sub>2</sub> коэффициент прилипания оставался практически неизменным во всем используемом диапазоне температур (50–120 °С).

Рассеяние одиночных пленок ВаF<sub>2</sub> мало, даже когда их толщины превышают несколько микрометров. В то же время, потери на рассеяние в покрытиях, состоящих из чередующихся слоев ВаF<sub>2</sub> и вещества с высоким показателем преломления, во много раз выше, чем в одиночной пленке такой же толщины. В связи с этим авторы исследовали на  $\lambda = 10,6$  мкм не только одиночные пленки, но и интерференционные покрытия типа 5–11-ти слойных зеркал.

Ранее авторами данной статьи было установлено, что рассеяние пленок ВаF<sub>2</sub> снижается при добавлении к нему некоторого количества другого фторида – MgF<sub>2</sub> [1, 2]. Легирование пленок фторидов другими фторидами (в особенности фторидом магния) приводит к увеличению относительной плотности пленок. Результаты измерения показателя преломления и относительной плотности пленок ВаF<sub>2</sub> при температуре напыления +75 °С и различных значениях содержания легирующей примеси MgF<sub>2</sub> приведены в табл. 1. Одновременно с увеличением относительной плотности снижалось рассеяние в пленках и зеркалах.

**Таблица 1.** Результаты измерения показателя преломления  $n_f$  и относительной плотности  $Q$  для пленок  $BaF_2$ , легированных  $MgF_2$ , при температуре напыления  $+75^\circ C$

Содержание $MgF_2$ , %	0	0,2	0,5	1	2	5
$n_{BaF_2}$	1,30	1,32	1,36	1,41	1,43	1,36
$Q_{BaF_2}$	0,67	0,71	0,79	0,94	0,95	0,79

**Таблица 2.** Результаты исследования пропускания и лучевой стойкости зеркал  $CO_2$ -лазеров из пленок  $BaF_2$  и  $ZnS$

Содержание $MgF_2$ , %	0	1	4
$T(10,6\text{мкм})$ , %	$\geq 8$	7–8	7–8
$R(10,6\text{мкм})$ , %	$< 90$	$\leq 90$	$< 90$
$T(0,63\text{мкм})$ , %	$< 10$	$\geq 60$	$\geq 60$
$E/S(10,6\text{ мкм})$ , Дж/см <sup>2</sup>	6–7	8–9	5–10

Рассеяние многослойных покрытий с легированными пленками исследовалось следующим образом. Изготавливались 9-слойные зеркала из пленок легированного  $BaF_2$  и  $ZnS$  на длину волны 10,6 мкм, а затем определялись отражение  $R$  и пропускание  $T$  этих зеркал на длинах волн 0,63 мкм и отражение на 10,6 мкм. Для длины волны 0,63 мкм поглощение в пленках  $BaF_2$  и  $ZnS$  и подложке из  $ZnS$  мало [4] и все потери приписывались потерям на рассеяние, т. е.  $A_{\text{расс}} = 1 - R - T$ . Для этих зеркал определялся также порог разрушения с помощью импульсного  $CO_2$ -лазера [2]. Результаты измерений 8-слойных зеркал для  $CO_2$ -лазера из пленок  $ZnS$  и  $BaF_2$  с примесью  $MgF_2$  от 0 до 2% на подложке из  $ZnS$  приведены в табл. 2. Изготавливались зеркала и с числом пленок более 8. Но они были нестабильны во времени и иногда разрушались в процессе изготовления.

При добавлении фторида магния более 1% весовой концентрации рассеяние снижается в 5 раз. Снижение содержания  $MgF_2$  увеличивает рассеяние. Большая (до 4–5%) добавка  $MgF_2$  хотя и несколько снижает рассеяние, приводит к появлению дефектов пленок в виде островков на подложке, на которых пленка практически не растет, а также к снижению коэффициента преломления пленки. Диаметр очагов 0,1–0,3 мм, их число растет при увеличении концентрации фторида магния. Наличием таких дефектов авторы объясняют большой разброс в результатах исследования лучевой стойкости  $E/S(10,6\text{ мкм})$ . Коэф-

фициент аккомодации снижается в 3–5 раз при использовании 2% примеси  $MgF_2$ . При дальнейшем увеличении процентного содержания  $MgF_2$  в пленках  $BaF_2$  напряжение в пленках достигает критического значения, и в результате покрытие разрушается. Зеркала с концентрацией фторида магния более 4% разрушались иногда уже в процессе изготовления. Увеличение концентрации  $MgF_2$  уменьшает плотность упаковки пленки.

Были также изготовлены зеркала  $CO_2$ -лазера из пленок  $BaF_2$  и  $ZnSe$ . Физико-механические свойства этих зеркал аналогичны зеркалам из пленок  $BaF_2$  и  $ZnS$ , однако их пропускание в видимой области в 2–4 раза меньше из-за высокого поглощения в пленках  $ZnSe$ .

### Диэлектрические покрытия для разделения видимого и инфракрасного излучений He-Ne и $CO_2$ -лазеров

Одной из задач, стоящих в лазерном приборостроении, является разделение (или сведение) лазерного излучения в видимой и инфракрасной областях спектра. Луч  $CO_2$ -лазера в инфракрасной области спектра невидим и для его наводки на мишень он сопровождается пилотным излучением лазера видимого диапазона спектра. Чаще всего в качестве источника пилотного излучения используются полупроводниковые или He-Ne-лазеры.

В общем виде задача формулируется следующим образом. На спектроделительную пластинку под углом  $45^\circ$  падает неполяризованное (или поляризованное) излучение двух лазеров. После прохождения пластинки излучения двух лазеров сводятся в пространстве. Необходимым условием являются минимальные потери излучения для силового и пилотного лучей.

Рассмотрим некоторые варианты решения этой задачи на базе изложенного выше материала с использованием пленок селенида или сульфида цинка и фторида бария. Возможны два решения: высокое отражение на 10,6 мкм и высокое пропускание на 0,63 мкм или высокое отражение на 0,63 мкм и высокое пропускание на 10,6 мкм.

Реализация первого решения на основе диэлектрических пленок связана с рядом трудностей. Для получения отражения порядка 98–99% на 10,6 мкм требуется зеркало из 13–16 пленок  $ZnS$  и  $BaF_2$ . Хотя изготовление таких зеркал и возможно с использованием специальных технологий, однако требует больших затрат

как материальных, так и временных. Авторами изготавливались 10-слойные зеркала на основе пленок ZnS и легированного BaF<sub>2</sub>. Их пропускание на длине волны 0,63 мкм не превышало 30% при отражении на 10,6 мкм 90–92%. Зеркала с большим числом слоев нестабильны.

Использование пленок ZnSe и BaF<sub>2</sub> снижает количество слоев, но такие зеркала практически непрозрачны в видимой области в основном из-за поглощения в пленках ZnSe и частично за счет рассеяния в пленках BaF<sub>2</sub>. Были изготовлены 10-слойные зеркала на основе пленок ZnSe и легированных пленок BaF<sub>2</sub>. Их пропускание на длине волны 0,63 мкм не превышало 10–15% при отражении 96–97% на 10,6 мкм.

Реализация второго решения предпочтительней, так как в этом случае можно использовать гораздо более тонкие пленки сульфида или селенида цинка в комбинации с пленками легированного фторида бария.

Наиболее удачным решением является использование неравнотолщинных пленок, суммарная оптическая толщина которых близка к 2,65 мкм.

С использованием программы, описанной в работе [5], были синтезированы и изготовлены спектроделительные покрытия, разделяющие излучения He-Ne и CO<sub>2</sub>-лазеров, на подложках из селенида цинка со структурой П(НЗL)<sup>4</sup>, где L – слой из легированного BaF<sub>2</sub>, Н – слой из As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, П – подложка. Оптические толщины слоев *h* из As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> составляли  $\lambda_0/4$ , а слоев из BaF<sub>2</sub> –  $3\lambda_0/4$ , где  $\lambda_0 = 0,7$  мкм. Полученное покрытие хорошо отражает неполяризованное излучение He-Ne-лазера и является просветляю-

щим для излучения CO<sub>2</sub>-лазера с длиной волны 10,6 мкм. Для угла падения 45° коэффициент отражения покрытия на длине волны 0,63 мкм был более 90%, а его коэффициент пропускания для неполяризованного излучения на длине волны 10,6 мкм – более 98%.

Рассчитанные спектры отражения этого покрытия для неполяризованных излучений, падающих под углом 45°, приведены на рис. 1.

Были изготовлены синтезированные покрытия на подложках из селенида цинка. Обратная сторона подложки просветлялась на длину волны 10,6 мкм. Изготовленные покрытия имели пропускание для неполяризованного излучения выше 98% на длине волны 10,6 мкм и отражение более 90% на длине волны 0,63 мкм.

### Металлодиэлектрические покрытия для разделения видимого и инфракрасного излучений He-Ne и CO<sub>2</sub>-лазеров

Для металлодиэлектрических покрытий возможен только вариант достижения максимального отражения на 10,6 мкм при сохранении достаточного пропускания на длине волны пилотного излучения. В этом случае в структуре покрытия между металлическими пленками располагается разделительный слой диэлектрика, т. е. формируется система, аналогичная интерферометру Фабри–Перо. Толщина разделительного слоя выбирается таким образом, чтобы фильтр был настроен на длину волны пилотного излучения, падающего под углом 45°. В качестве металлических слоев традиционно используются пленки серебра, также возможно применение более стабильных и химически инертных пленок золота.

В паре с пленками золота могут быть использованы слои селенида цинка, сульфоселенидов мышьяка и фторидов. Пленки серебра по причине химического взаимодействия не сочетаются с соединениями серы и селена, поэтому разделительный слой обычно выполняют, например, из фторида магния. Расчетные спектральные характеристики некоторых металлодиэлектрических покрытий на подложках из лейкосапфира представлены на рис. 2 и 3. В структурах покрытий, приведенных в подписях к рисункам, указаны геометрические толщины слоев.

Пленки серебра со временем подвержены старению. Во избежание этого поверх всего покрытия наносится защитный слой кварца толщиной несколько сотен ангстрем, который качественно

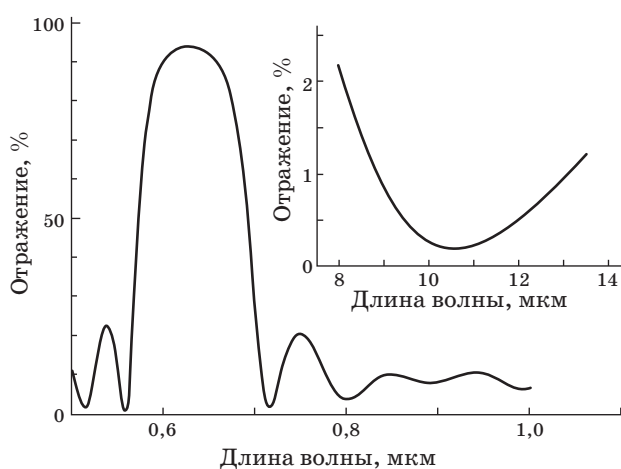
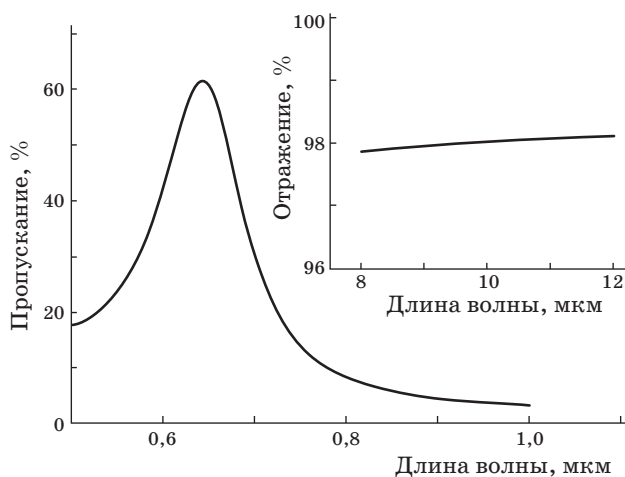
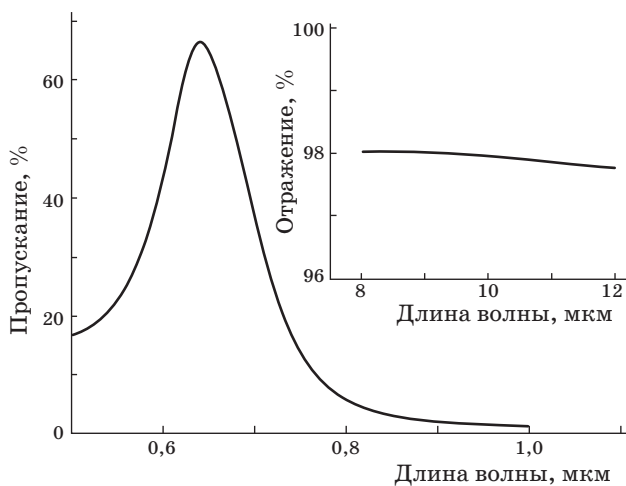


Рис. 1. Спектральные характеристики отражения диэлектрических покрытий.





**Рис. 2.** Отражение и пропускание металлодиэлектрического покрытия со структурой П-Au (25 нм)-ZnSe (72 нм)-Au (25 нм).



**Рис. 3.** Отражение и пропускание металлодиэлектрического покрытия со структурой П-Ag (18 нм)-MgF<sub>2</sub> (200 нм)-Ag (18 нм).

не изменяет спектральные характеристики покрытия, но защищает наружный слой серебра от быстрой деградации во времени.

Расчетные кривые отражения металлодиэлектрических покрытий, синтезированных с использованием пленок золота и серебра, в максимуме отражения на длине волны 10,6 мкм имеют 98%. Отражение изготовленных авторами покрытий в этой области составляло не более 95%. Причиной подобного ухудшения отражательной способности, по всей видимости, являлась островковая структура относительно тонких

пленок золота и серебра. Толщина металлических слоев в этом случае не могла быть увеличена из-за необходимости сохранения пропускания в видимом диапазоне спектра. Пропускание покрытий в максимуме достигало 50%.

Таким образом, металлодиэлектрические покрытия имеют достаточное пропускание на заданной длине волны видимого диапазона и отражают практически весь ИК диапазон спектра.

## Заключение

В работе показано, что имеются несколько вариантов решения задачи разделения силового излучения CO<sub>2</sub>-лазера и пилотного излучения с помощью интерференционных покрытий. Использование при синтезе и изготовлении диэлектрических покрытий легированных пленок фторида бария в паре с сульфоселенидами цинка или мышьяка позволяет получать тонкослойные системы, одновременно отражающие видимое пилотное излучение и просветляющие оптические элементы из селенида цинка на длине волны силового излучения CO<sub>2</sub>-лазера. С применением металлодиэлектрических покрытий реализуется обратный вариант: пропускается пилотное излучение видимого диапазона и отражается излучение на длине волны 10,6 мкм. Возможность применения того или иного решения в каждом конкретном случае определяется по совокупности технических требований, предъявляемых к подобным оптическим системам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Котликов Е.Н., Болошин Ю.А., Салиев М.А. Разработка и исследование диэлектрических зеркал с повышенной лучевой прочностью для импульсных CO<sub>2</sub> лазеров // ЖТФ. 1987. № 11. С. 2261–2264.
2. Котликов Е.Н., Хонинева Е.В., Прокашев В.Н. Проблема снижения оптических потерь в пленках фторидов // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 6. С. 84–87.
3. Риттер Э. Пленочные диэлектрические материалы для оптических применений // Физика тонких пленок / Под ред. Хасса Г., Франкомба М., Гофмана Р. М.: Мир, 1978. Т. 8. С. 7–60.
4. Справочник технолога-оптика / Под общ. ред. Кузнецова С.М. и Окатова М.А. Л.: Машиностроение, Л. О., 1983. 414 с.
5. Котликов Е.Н., Прокашев В.Н., Хонинева Е.В., Хонинев А.Н. Синтез светоделительных покрытий // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 8. С. 49–54.