

## ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ ГЕРМАНИЯ И КРЕМНИЯ В ОКНАХ ПРОЗРАЧНОСТИ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА 3–5 МКМ И 8–12 МКМ

© 2009 г. **И. С. Гайнутдинов**, доктор техн. наук; **Н. Ю. Шувалов**;  
**Р. С. Сабилов**, канд. техн. наук; **В. А. Иванов**; **Р. Р. Гареев**, **Н. Г. Мирханов**  
 НПО “Государственный институт прикладной оптики”, Казань

Представлены конструкции просветляющих покрытий на подложках из германия и кремния с использованием пленкообразующих материалов ZnS, Ge, YF<sub>3</sub>, MgF<sub>2</sub>. Приведены спектральные характеристики остаточного отражения и пропускания покрытий в диапазонах спектра 3–5 мкм и 8–12 мкм.

Коды OCIS: 310.3840.

Поступила в редакцию 25.12.2008.

В последнее время возрастает потребность в эффективных просветляющих покрытиях для полупроводниковых материалов в окнах прозрачности атмосферы (3–5 и 8–12 мкм), имеющих высокую механическую и эксплуатационную устойчивость.

Решение данной задачи на современном этапе заключается, прежде всего, в расширении спектрального рабочего диапазона просветляющего покрытия, увеличении номенклатуры применяемых материалов, особенно из материалов с низким значением показателя преломления, обладающих малым поглощением и высокими эксплуатационными параметрами в заданных областях спектра, и доведение разработанной конструкции до устойчивой промышленной технологии.

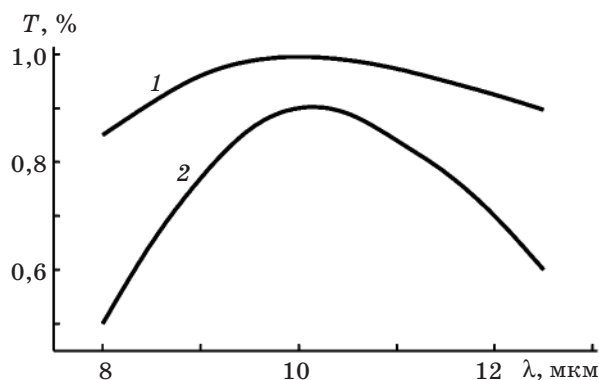
В инфракрасной (ИК) области спектра оптические элементы изготавливаются из прозрачных в данном диапазоне полупроводниковых кристаллов, имеющих большой показатель преломления. При достаточно большом числе элементов в оптической системе ее прозрачность оказывается малой из-за потерь излучения на отражение от поверхностей. К примеру, для системы из 4 германиевых линз, работающей в диапазоне 8–12 мкм, прозрачность составляет 0,0281 от исходной. Применение такой системы без просветляющих покрытий невозможно.

Простейшим и наиболее распространенным случаем просветления оптических деталей является нанесение на их поверхности однослойного покрытия, оптическая толщина которого равна четверти центральной длины волны рабочего спектрального интервала, а значение показателя преломления, определяемое из условия минимальности отражения света от покрытой

поверхности, должно быть возможно ближе к корню квадратному из значения показателя преломления оптической детали. Минимальное значение коэффициента отражения достигается для этого покрытия в одной точке рабочего спектрального диапазона, соответствующей его центру, и равно

$$R = \frac{(n - n_1^2)^2}{(n + n_1^2)^2}, \quad (1)$$

где  $n_1$  – показатель преломления оптической детали, а  $n$  – показатель преломления слоя,  $R$  – остаточное отражение. Если  $n_1^2 = n$ , то  $R = 0$  и снижение прозрачности в максимуме на рис. 1 не происходит. Если  $n_1^2 \neq n$ , то с увеличением числа поверхностей снижается и значение прозрачности.



**Рис. 1.** Расчетная спектральная характеристика пропускания пластин из германия однослойным просветляющим покрытием из сульфида цинка. 1 – просветление одной поверхности, 2 – просветление восьми поверхностей.

Однослойное просветление достаточно селективно и при широких рабочих спектральных интервалах интегральное пропускание сравнительно быстро уменьшается за счет стремления коэффициента отражения к значению непросветленной оптической детали. Интегральное значение коэффициента отражения (от одной поверхности) при неселективном приемнике излучения в некоторой полосе частот (за границами этой полосы чувствительность полагается нулевой) равно [1]

$$R = 1 - \frac{4nn_1}{x(1+n_1)(n^2+n_1)} \operatorname{arctg} \left( \frac{n(1+n_1)}{(n^2+n_1)} \operatorname{tg} x \right). \quad (2)$$

Здесь под  $x$  понимается полуширина полосы отражения, выраженная в частотах. При оценке интегральных потерь на отражение от системы из  $N$  поверхностей второй член правой части выражения (2) следует возвести в степень  $N$ , что показывает сужение ширины рабочего спектрального интервала при однослойном просветлении (рис. 1).

$$R = 1 - \left( \frac{4nn_1}{x(1+n_1)(n^2+n_1)} \right)^N \times \operatorname{arctg}^N \left( \frac{n(1+n_1)}{(n^2+n_1)} \operatorname{tg} x \right). \quad (3)$$

С увеличением числа поверхностей в системе ширина области высокого пропускания быстро уменьшается, и не зависит от равенства  $n_1^2 = n$ , а зависит только от оптических свойств однослойного интерференционного слоя.

Развитая в [1–6] теория показывает, что ахроматизация просветления вполне возможна при увеличении числа слоев в покрытии и обязательного увеличения толщины покрытия в целом. Среди конструкций ахроматических просветляющих покрытий следуют различать системы с дискретным изменением показателей преломления слоев и непрерывным изменением показателя преломления вдоль толщины покрытия. Покрытия с непрерывно меняющимся показателем преломления несравненно эффективнее и, видимо, могут быть использованы в очень широких спектральных интервалах, однако их изготовление связано с существенными, зачастую практически непреодолимыми, технологическими проблемами. Разбиение неоднородной по показателю преломления пленки на ряд более тонких однородных слоев позволяет обеспечить достаточный уровень ахроматизации просветления, однако при этом будут использо-

ваться пленки с промежуточными показателями преломления, что не всегда удается реализовать на практике.

Часто интересные теоретические решения задач синтеза просветляющих покрытий повышенной оптической эффективности в ИК области спектра содержат слои с “нереальными” показателями преломления, т. е. не имеющими аналогов среди пригодных к использованию материалов. Так в работе [7] приведены теоретические спектральные характеристики покрытий с очень хорошими значениями коэффициентов пропускания и отражения, но показатели преломления отдельных слоев не соответствуют ни одному из известных материалов.

Самый прямой метод получения пленок с промежуточными показателями преломления состоит в приготовлении смеси материалов и совместном напылении их из одного испарителя. Применение этого метода строго ограничивается фракционированием при испарении, если температуры испарения компонентов смеси значительно отличаются друг от друга [8]. Эффективным методом является так называемое взрывное испарение [9]. Смесь подается небольшими порциями на заранее разогретый испаритель, благодаря чему происходит одновременное испарение компонентов. Однако наиболее гибким методом является одновременное напыление компонентов из нескольких источников при применении методов контроля скорости напыления. На стандартном оборудовании, не имеющем систем контроля скорости нанесения покрытия, получение стабильных периодически повторяющихся результатов последним методом крайне затруднительно.

Другой, не менее важной стороной рассматриваемой проблемы являются физико-химические и механические характеристики пленок из применяемых материалов. В частности, к таким характеристикам можно отнести механическую прочность пленок, их химические свойства (растворимость), а также стойкость к воздействию окружающей среды.

В существующих нормативных документах (ОСТ3-1901-95, ОСТ3-6246-87) в основном используются пленки из  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{PbF}_2$  и др., не устойчивые к климатическим воздействиям и имеющие недостаточную механическую прочность. Для устранения этих недостатков авторами работы проведено исследование с целью по применению более устойчивых материалов и разработки на их основе ряда конструкций просветляющих покрытий, имеющих

требуемые спектральные характеристики и эксплуатационные параметры.

В качестве устойчивых слоев с низким показателем преломления были рассмотрены пленки фторидов магния, тория и иттрия.

Фторид магния находит исключительно широкое применение в качестве материала для покрытий с низким показателем преломления. Однако пленки  $MgF_2$  обладают чрезвычайно высокими растягивающими напряжениями. В связи с этим при увеличении толщины пленки наблюдается появление трещин на покрытии, что ограничивает их использование в области спектра 8–12 мкм [5].

Одной из наиболее подробных работ, в которой рассмотрены оптические свойства слоев фторида иттрия, безусловно, является работа [10]. В ней показатель преломления слоя определен равным 1,48 для 4 мкм и 1,3 для 10,6 мкм. Указано, что при температуре подложек менее 180 °С пленки имеют аморфную структуру с переходом на кристаллическую при повышении этой температуры до значений, превышающих 200 °С. Для пленок фторида иттрия характерно наличие поглощения на длине волны 2,94 мкм и в диапазонах 6,2–7 мкм и далее 10 мкм, связанное с внедрением в поры пленки паров воды [9].

Пленки фторида тория [5] прозрачны в диапазоне длин волн от 0,2 до 15 мкм, стабильны механически, химически устойчивы и имеют внутренние растягивающие напряжения. Можно получить очень толстые пленки  $ThF_4$ , которые не растрескиваются и не отслаиваются, что делает их вполне пригодными для использования в инфракрасном диапазоне. Очевидным недостатком  $ThF_4$  является его радиоактивность. Необходимо соблюдать все меры предосторожности, предусмотренные для работы с радиоактивными материалами в соответствии с имеющимися правилами. В связи с отсутствием необходимого оборудования пленки фторида тория в нашей стране не используются.

Исходя из всего вышеизложенного авторами данной работы предлагается ряд конструкций просветляющих покрытий с использованием слоев из германия, сульфида цинка, фторида иттрия, фторида магния, имеющих высокое значение пропускания и низкое значение остаточного отражения и обладающих хорошими эксплуатационными свойствами.

На рис. 2 и рис. 3 представлены спектральные характеристики пропускания и отражения просветляющего покрытия (0,25Н 0,25В 0,5Н 0,6Н' 0,125Н) в области спектра 3,5–5 мкм, состоя-

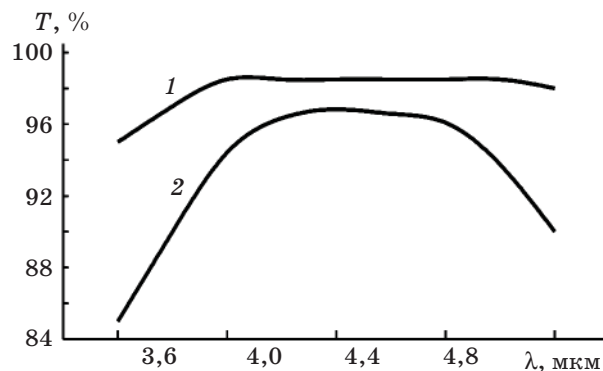


Рис. 2. Спектральная характеристика пропускания пятислойного просветляющего покрытия на детали из Ge с использованием слоев из  $MgF_2$ , ZnS и Ge в спектральном диапазоне 3,5–5,0 мкм. 1 – просветление одной поверхности, 2 – просветление восьми поверхностей.

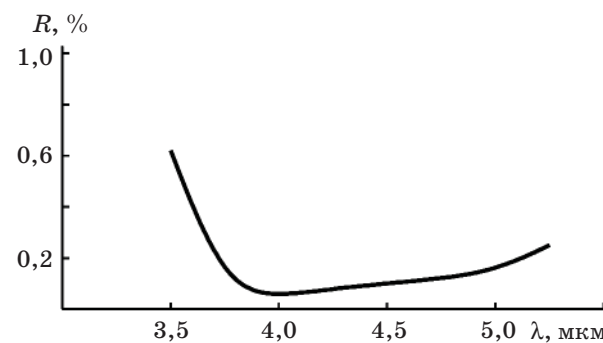
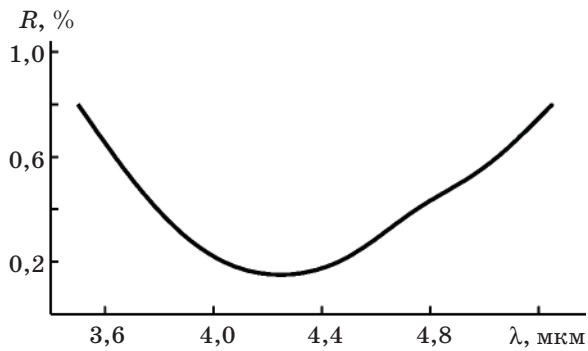


Рис. 3. Спектральная характеристика отражения пятислойного просветляющего покрытия на детали из Ge с использованием слоев из  $MgF_2$ , ZnS и Ge в спектральном диапазоне 3,5–5,0 мкм.

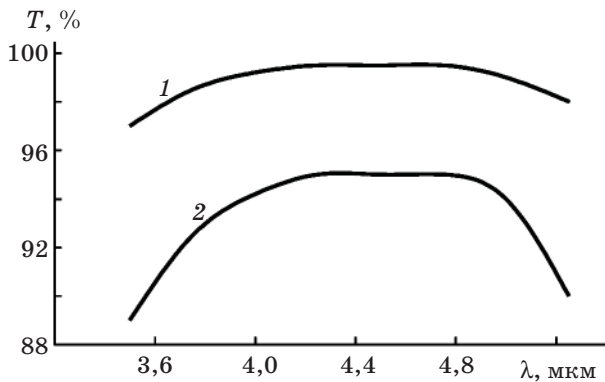
щего из слоев сернистого цинка (Н), германия (В) и фторида магния (Н'). Область наивысшего просветления находится в диапазоне длин волн 3,75–4,75 мкм, что соответствует зоне наибольшей чувствительности применяемого в приборе фотоприемника. Таким образом, использование этого покрытия в приборе позволяет существенно повысить эффективность его работы.

В приборах, где используется оптика из кремния, данное просветляющее покрытие также является довольно эффективным. Характеристика покрытия на подложке из кремния толщиной 2 мм приведена на рис. 4. Практически полученное среднее значение коэффициента отражения составляет 0,6% в области 3,5–5 мкм.

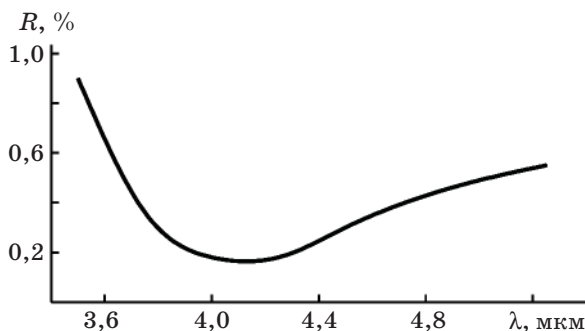
На рис. 5 и рис. 6 представлены спектральные кривые пропускания и отражения просветляющего покрытия на германиевой подложке, где



**Рис. 4.** Спектральная характеристика отражения пятислойного просветляющего покрытия на детали из Si с использованием слоев из  $MgF_2$ , ZnS и Ge в спектральном диапазоне 3,5–5,0 мкм.



**Рис. 5.** Спектральная характеристика пропускания пятислойного просветляющего покрытия на детали из Ge с использованием слоев из  $YF_3$ , ZnS и Ge в спектральном диапазоне 3,5–5,0 мкм. 1 – просветление одной поверхности, 2 – просветление восьми поверхностей.

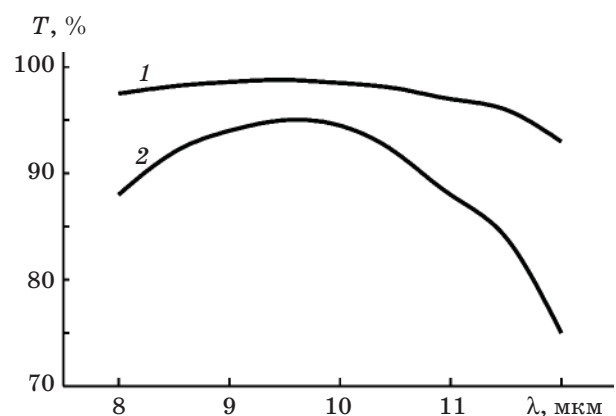


**Рис. 6.** Спектральная характеристика отражения пятислойного просветляющего покрытия на детали из Ge с использованием слоев из  $YF_3$ , ZnS и Ge в спектральном диапазоне 3,5–5,0 мкм.

в качестве слоя с низким показателем преломления используется фтористый иттрий. Конструкция покрытия имеет вид 0,215Н 0,346В 0,45Н 0,45Н' 0,201Н. Значение пропускания в этом случае оказывается несколько выше, чем в конструкции с фторидом магния, но в более узкой области спектра и составляет 98,9% для диапазона длин волн 3,5–5 мкм.

Из сравнения представленных характеристик просветляющих покрытий с использованием  $MgF_2$  (рис. 1 и 2) и  $YF_3$  (рис. 4 и 5) можно отметить следующее. Коэффициент отражения системы, в конструкции которой в качестве слоя с низким показателем преломления применяется фторид магния, более низкий, что предполагает получение более высокого пропускания, однако практически значение пропускания данной конструкции получено более низкое, что по мнению авторов может быть объяснено различными значениями коэффициентов поглощения и рассеяния излучения на поверхностях слоев, используемых материалов. Данный вопрос требует специального рассмотрения и не является темой представленной работы.

Эта же конструкция с использованием материала  $YF_3$  (0,215Н 0,346В 0,45Н 0,45Н' 0,201Н) может быть применена для просветления Ge в области спектра 8–12 мкм. Спектральная характеристика просветленной германиевой пластины представлена на рис. 7. Среднее значение коэффициента пропускания в указанном диапазоне составляет 97%. При этом наблюдается спад пропускания в длинноволновой области (далее



**Рис. 7.** Спектральная характеристика пропускания пятислойного просветляющего покрытия на детали из Ge с использованием слоев из  $YF_3$ , ZnS и Ge в спектральном диапазоне 8,0–12,0 мкм. 1 – просветление одной поверхности, 2 – просветление восьми поверхностей.

11,5 мкм). Это объясняется наличием поглощения в слоях фторида иттрия [11].

При синтезе покрытий авторы стремились находить наиболее простые решения на основе устойчивых и физико-химически совместимых материалов. Слои из всех использованных в работе материалов имеют высокие показатели по микротвердости и влагостойкости. Проведенные испытания на влагостойкость (влажность 95–98% при температуре 35 °С), термоциклирование (+70 °С, –60 °С) и механическую прочность (“0” группа по ОСТЗ-1901-95) показали полную работоспособность разработанных покрытий.

Все рассмотренные выше покрытия были экспериментально получены на стандартном оборудовании типа ВУ-1А. Разработанная технология нанесения слоев дает возможность изготавливать просветляющие покрытия с высокой воспроизводимостью характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Хайбуллин И.Б.* Интерференционные покрытия для оптического приборостроения. Казань: изд. “Фэн”, 2002. 592 с.
2. *Кард П.Г.* Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок. Таллин, Валгус, 1971.
3. *Кокс Дж. Т., Хасс Г.* / Сб. Физика тонких пленок. Т. 2, стр.186–253, М., Мир, 1967.
4. *Кард П., Несмелов Е., Колюхов., Иванов В.* Просветление трехслойным симметричным покрытием // Известия АН Эстонской ССР. 1969. Т. 18. № 2. С. 186–192.
5. *Pumter Э.* Пленочные диэлектрические материалы для оптических применений // Сб. Физика тонких пленок. Т. 8. М.: Мир, 1967. С. 7–60.
6. *Pulker H.* Appl. Opt. 1979. V.18. № 12. P.1969–1977.
7. *Соколова Р.С., Михайлов А.В., Муранова Г.А.* Просветляющие покрытия повышенной оптической эффективности для ИК области спектра // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 10. С. 72–75.
8. *Якобсон Р.* Неоднородные и совместно напыленные однородные пленки для оптических применений // Сб. Физика тонких пленок. Т. 8. М.: Мир, 1967. С. 61–75.
9. *Холлэнд Л.,* Нанесение тонких пленок в вакууме, Госэнергоиздат, М., 1963.
10. *Bezuidenhout D. и др.* The optical properties of YF<sub>3</sub> films. – Thin Solid Films. 1987. 155. С. 17–30.
11. *Панасенко Б.В.* Исследование влияния сорбции атмосферной влаги на оптические свойства тонких диэлектрических пленок и многослойных интерференционных систем // Дис. канд. физико-математических наук. Казань, 1984.