

ДОСТИЖЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2007 г. **И. С. Гайнутдинов***, доктор техн. наук; **Е. А. Несмелов***, доктор физ.-мат. наук;
М. Х. Азаматов*; **Р. Т. Каримов***; **Р. Г. Сафин***; **Г. И. Абзалова****

* НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

** ООО “Научно-производственное предприятие оптических покрытий”, г. Казань

Представлены результаты теоретических исследований влияния пористости пленок и шероховатости поверхности подложек на спектральные характеристики просветляющих покрытий. Проведены оценки реально достижимых значений пропускания и отражения просветляющих покрытий в зависимости от открытой пористости пленок и качества полирования поверхности подложек.

Коды OCIS: 310.6860.

Поступила в редакцию 07.09.2006.

В современном оптическом приборостроении одной из актуальных задач является разработка просветляющих покрытий. При большом числе элементов в оптической системе ее пропускание в значительной мере снижается из-за потерь излучения на отражение от поверхностей отдельных элементов. Для уменьшения этих потерь все рабочие поверхности оптической системы просветляются. На практике получение очень малых коэффициентов отражения и близкого к единице пропускания не всегда удается. Обычно это связывают с неточностью воспроизведения показателей преломления слоев и отклонениями их толщин от расчетных, допущенными в процессе изготовления. В работе [1] показано, что неидеальность поверхностей пленок и подложки также приводит к искажению спектральной характеристики покрытия, и ошибки в толщине слоев не всегда являются основной причиной изменения оптических свойств интерференционного покрытия. Истинные причины, по которым просветление может оказаться недостаточно эффективным, значительно сложнее.

Теоретические разработки просветляющих интерференционных покрытий [2–4] базируются на модели идеально ровных поверхностей подложки и пленок, полном отсутствии поглощения в подложке и пленках и однородности пленок. Реальные оптические поверхности всегда имеют некоторую шероховатость, что выражается в появлении рассеянного от поверхности излучения. Рассеяние излучения от поверхности является потерей, которую необходимо учитывать в полном балансе излучения. Поверхности пленок также имеют шероховатость, т. е. и на них присутствуют потери, обусловленные рассеянием излучения. Пленки содержат поры, что проявляется в появлении полос поглощения характерных для воды, адсорбированной в порах, и является причиной, по которой происходит изменение

среднего значения показателя преломления пленки по сравнению с кристаллическим материалом. Таким образом, все предположения об идеальности слоев, составляющих покрытие, оказываются выполненными только приближенно. Очевидно, что все названные факторы достаточно малы. Однако достижение предельно возможных значений пропускания и отражения света интерференционным просветляющим покрытием может ограничиваться именно указанными факторами.

В качестве примера рассмотрим изменение оптических свойств простого просветляющего покрытия, состоящего из слоев сульфида цинка, германия и фторида иттрия. Конструкция покрытия может быть представлена в виде

$$D0,22H0,29H_10,58H0,82L,$$

где D – подложка из германия, H – четвертьволновый слой сульфида цинка, H_1 – четвертьволновый слой германия, L – четвертьволновый слой фторида иттрия; числами около символов слоев обозначена толщина слоев в долях четверти длины волны при $\lambda_0 = 10$ мкм. На рис. 1 показаны расчетные спектральные характеристики этого покрытия в предположении идеальных границ слоев, однородности и беспористости пленок; видно, что покрытие обладает хорошей ахроматичностью и великолепно просветляет германиевую поверхность.

Реальные пленки, полученные испарением и конденсацией материалов в вакууме, имеют столбчатую структуру [5] с порами, расположенными по границам зерен. В этом случае показатели преломления пленок должны быть заменены эффективными значениями [6, 7] и, в силу выделенности оси (направление структуры), пленка должна считаться одноосной. Если пленка выращивается при направлении поступающих паров, флуктуирующем около направления нормали к подложке, то есть основа-

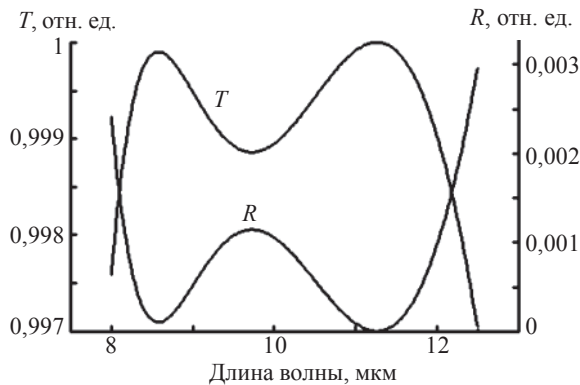


Рис. 1. Спектральные характеристики идеального просветляющего покрытия. T – пропускание, R – отражение.

ния считать, что ось полученной структуры нормальна к поверхности подложки и флуктуации в ее направлении малы, так как процессы диффузии должны сглаживать эти флуктуации.

Внутри зерен пленки при ее образовании также появляется пористость, зависящая от характера роста зерен, но эта пористость замкнута и не может адсорбировать воду, хотя может изменяться при температурных воздействиях (например, при отжиге пленки при более высоких температурах, чем температура нанесения). Наличие замкнутой пористости приводит к изменению показателя преломления пленки, что можно учесть введением изотропного эффективного показателя преломления.

Средняя диэлектрическая проницаемость материала с замкнутыми порами представляется [6, 7] в виде

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_m \frac{2\varepsilon_m(1-f) + (1+2f)\varepsilon}{\varepsilon_m(2+f) + (1-f)\varepsilon}, \quad (1)$$

где ε_m – диэлектрическая проницаемость матрицы, ε – диэлектрическая проницаемость материала, содержащегося в порах, f – пористость.

В этом случае поры считаются в среднем сферическими, что и приводит к изотропии. Естественно, можно считать эти поры соединенными некими каналами и таким образом представлять заполнение этих пор водой. По-видимому, такое представление следует считать надуманным. Правильнее полагать открытые поры ориентированными вдоль основных элементов роста пленки, т. е. столбчатых выделений. При этом диэлектрическая проницаемость материала может быть выражена следующим образом:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon} \frac{\bar{\varepsilon} - g(\bar{\varepsilon} - \varepsilon) - f_1(1-g)(\bar{\varepsilon} - \varepsilon)}{\bar{\varepsilon} - g(\bar{\varepsilon} - \varepsilon) + f_1g(\bar{\varepsilon} - \varepsilon)}, \quad (2)$$

здесь $\bar{\varepsilon}$ – диэлектрическая проницаемость матрицы с возможным учетом закрытых пор, ε – диэлектри-

ческая проницаемость материала внутри пор, f_1 – пористость, g – фактор деполяризации, который может быть выражен для поля, направленного по нормали к пленке, соотношением

$$g = \frac{1-e^2}{2e^3} \left(\ln \frac{1+e}{1-e} - 2e \right), \quad (3)$$

где

$$e = \left(1 - \frac{r^2}{h^2} \right)^{1/2},$$

r – радиус цилиндрической поверхности поры, h – ее длина (в большинстве случаев длину поры можно отождествить с толщиной пленки).

Для поля нормального к поверхности $g = 0$. Для поля параллельного поверхности пленки фактор g оказывается равным $(1-g)/2$. Если поры сферические, то фактор g одинаков по всем направлениям и равен $1/3$. Наличие фактора деполяризации приводит к появлению анизотропии в оптических свойствах пленки. В этом случае пленку следует рассматривать как одноосный кристалл. В приближении эффективной среды, учитывая особенности технологии изготовления пленочных покрытий, можно считать, что ось пор нормальна поверхности пленки (при рассмотрении открытой пористости), фактор g в этом случае равен нулю при направлении по оси и $1/2$ в перпендикулярном направлении, и эффективные диэлектрические постоянные материала пленки можно выразить следующим образом:

$$\varepsilon_o = \bar{\varepsilon} - f_1(\bar{\varepsilon} - \varepsilon) \quad (4)$$

для обыкновенного луча и

$$\varepsilon_e = \bar{\varepsilon} \frac{\bar{\varepsilon} + \varepsilon - f_1(\bar{\varepsilon} - \varepsilon)}{\bar{\varepsilon} + \varepsilon + f_1(\bar{\varepsilon} - \varepsilon)} \quad (5)$$

для необыкновенного луча.

Оценка пористости тонких пленок, нанесенных на призму МНПВО (метод нарушенного полного внутреннего отражения), была предложена в [8–10] на основе того факта, что при обязательной сорбции воды в порах пленки в спектре пропускания покрытия появляются полосы поглощения воды. Интенсивность полосы поглощения воды соответствует ее массе в пленке [11] и позволяет провести оценку пористости, что и было отмечено и использовано в [8–10]. При этом в [8–10] пленка считалась изотропной и ее структура не учитывалась.

На рис. 2 показаны спектральные характеристики рассмотренного выше просветляющего покрытия с учетом открытой пористости составляющих его пленок. Из рисунка видно, что в области 8–12,5 мкм поглощение адсорбированной в порах воды проявляется в снижении прозрачности поверх-

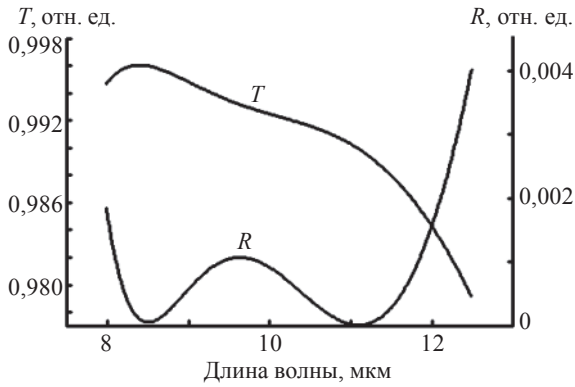


Рис. 2. Спектральные характеристики просветляющего покрытия с идеальными границами и пористыми пленками. T – пропускание, R – отражение.

ности с покрытием и практически не проявляется в отражательной способности. Естественно, величина пористости пленок будет зависеть от принятой технологии изготовления покрытий и может меняться

в зависимости от условий нанесения. Полное исключение пористости маловероятно, поэтому поглощение может несколько варьироваться, но оно должно оставаться.

Реальные поверхности подложек и пленок не являются идеальными плоскостями и имеют шероховатость. Шероховатости поверхности подложки зависит от качества и методов механической обработки, а шероховатость поверхности пленки зависит от ее толщины, материала, шероховатости подложки и технологических факторов (давления остаточных газов, температуры подложки, скорости нанесения пленки) при получении данной пленки. Шероховатость поверхностей подложки и пленок приводит к флуктуациям фазы при отражении и пропускании световой волны через каждую поверхность, что обеспечивает появление потерь излучения на рассеяние [1, 6]. Расчет оптических свойств многослойного покрытия с шероховатыми поверхностями проводится по рекуррентным формулам [1, 6], которые имеют вид:

$$R = \frac{(1 - r_1^2 r_2^2 e^{-2\alpha - 2\gamma})(r_1^2 + r_2^2 e^{-2\alpha}) + 2r_1 r_2 (1 - r_1^2 r_2^2 e^{-2\alpha}) e^{-\alpha - \gamma} \cos\varphi - 2r_1^2 r_2^2 e^{-2\alpha} (1 - e^{-2\gamma})}{(1 - r_1^2 r_2^2 e^{-2\alpha})(1 + r_1^2 r_2^2 e^{-2\alpha - 2\gamma} + 2r_1 r_2 e^{-\alpha - \gamma} \cos\varphi)}, \quad (6)$$

$$\Delta = \Delta_1 + \operatorname{arctg} \frac{r_2 e^{-\alpha} (r_1^2 - 1) \sin\varphi}{r_1 (1 + r_2^2 e^{-2\alpha}) + r_2 e^{-\alpha} (1 + r_1^2) \cos\varphi}, \quad (7)$$

$$T = \frac{(1 - r_1^2 r_2^2 e^{-2\alpha - 2\gamma})(1 - r_1^2)(1 - r_2^2) e^{-\alpha}}{(1 - r_1^2 r_2^2 e^{-2\alpha})(1 + r_1^2 r_2^2 e^{-2\alpha - 2\gamma} + 2r_1 r_2 e^{-\alpha - \gamma} \cos\varphi)}, \quad (8)$$

где r_1 – отражение на первой границе слоя, r_2 – отражение на второй границе слоя, α – поглощение в слое при одном проходе световой волны, $\varphi = \frac{4\pi n h}{\lambda} - \Delta_2 + \Delta_1$, n – показатель преломления слоя, h – геометрическая толщина слоя, $\gamma = \delta\varphi$ – флуктуация φ , Δ_1 и Δ_2 – сдвиги фазы при отражении на соответствующей границе.

Расчет по этим формулам для случая поверхности, полированной по классу 0-20 ГОСТ 1141-95, приведен на рис. 3. Из этого рисунка заметно, что даже очень малая шероховатость поверхностей подложки и пленок дает некоторое искажение спектральных характеристик пропускания и отражения. Искажения спектральных характеристик малы, поскольку рассматривается почти идеально отполиро-

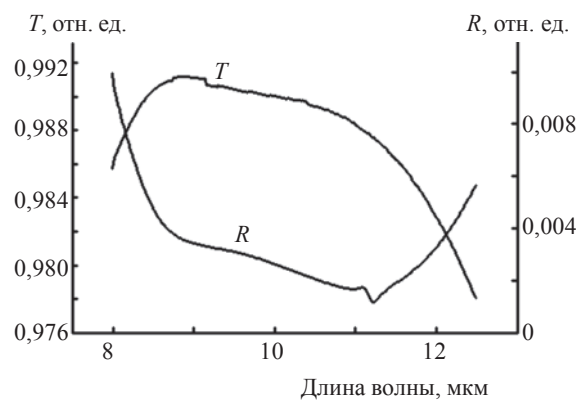


Рис. 3. Спектральные характеристики просветляющего покрытия с пористыми пленками и поверхностями с малой шероховатостью. Подложка соответствует высокому классу чистоты. T – пропускание, R – отражение.

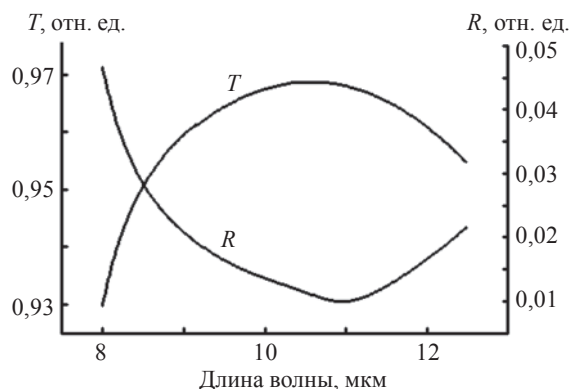


Рис. 4. Спектральные характеристики просветляющего покрытия с пористыми пленками и поверхностями с малой шероховатостью. Подложка соответствует 7 классу чистоты. T – пропускание, R – отражение.

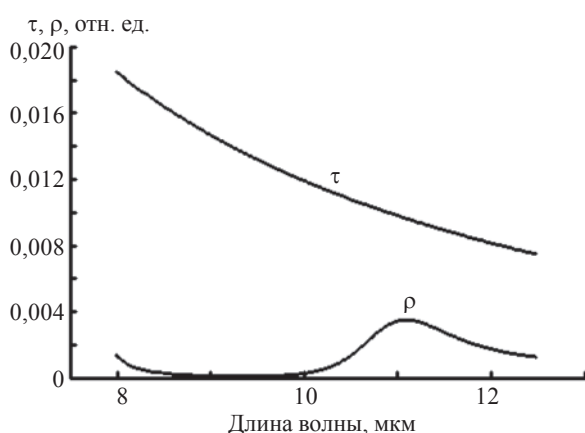


Рис. 5. Спектральные характеристики рассеяния просветляющего покрытия с пористыми пленками и шероховатыми границами. Подложка обработана по 7 классу чистоты. τ – рассеяние в проходящем излучении, ρ – рассеяние в отраженном излучении.

ванная поверхность подложки. Если рассматривать поверхность германия, отполированную по 7 классу чистоты по ГОСТ 11141-95, то искажения оказываются значительно больше. Результаты расчета этого случая представлены на рис. 4. Следует заметить, что результаты расчета близки к экспериментальным данным, например, [12].

На рис. 5 показаны спектральные характеристики рассеяния проходящего и отраженного лучей для просветления на поверхности 7 класса чистоты. В этом случае потери на рассеяние достаточно заметны. Интересно отметить, что рассеяние на самой поверхности германия с 7 классом чистоты,

по крайней мере, на два порядка меньше. Увеличение рассеяния происходит за счет увеличивающихся при нанесении просветляющего покрытия флуктуаций фазы.

Из представленных результатов видно, что просветляемая поверхность должна быть обработана по высокому классу чистоты, в противном случае просветление оказывается недостаточно эффективным. Таким образом, достижение предельных спектральных характеристик просветления возможно только при хорошей обработке просветляемой поверхности и получении беспористых пленок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Сабиров Р.С., Мустаев Р.М., Абзалова Г.И., Михайлов А.В. Влияние флуктуаций оптической толщины слоев на характеристики просветляющих покрытий // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 1. С. 62–67.
2. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. М.: Физматгиз, 1958.
3. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973.
4. Кард П.Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок. Таллин: Валгус, 1971.
5. Бабад-Захрятин А.А. Дефекты покрытий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 152 с.
6. Абзалова Г.И. Моделирование оптических свойств реальных просветляющих покрытий // Автореферат диссертации. Казань, 2005. 19 с.
7. Дмитрук Н.Л., Литовченко В.Г., Стрижевский В.Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. Киев: Наукова думка, 1989. 375 с.
8. Первеев А.Ф., Муранова Г.А., Золотарев В.М. Спектроскопический метод определения сорбционной способности и пористости тонких пленок твердых веществ // ФТТ. 1972. Т. 14. № 10. С. 2909–2911.
9. Первеев А.Ф., Муранова Г.А. Пористость тонких слоев, полученных в вакууме // ОМП. 1973. № 2. С. 73–74.
10. Муранова Г.А. Исследование микропористости тонких пленок и ее влияние на оптические характеристики одиночных слоев и многослойных интерференционных систем // Дисс. канд. техн. наук. Л.: ГОИ, 1975.
11. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред. Л.: Химия, 1984.
12. Гайнутдинов И.С., Гусев А.Г. и др. Двухдиапазонное просветление оптических элементов для тепловизионных приборов // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 4. С. 64–66.