

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики полупроводников и оптоэлектроники

**ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ**

(Лабораторный практикум для магистров)

Нижний Новгород, 2007

*Учебно-методические материалы подготовлены в рамках
инновационной образовательной программы ННГУ:
Образовательно-научный центр
«Новые многофункциональные материалы и нанотехнологии»
Национального проекта «Образование»*

УДК 621.315.592:61

Получение многослойных оптических покрытий методом электроннолучевого испарения / Лаб. практикум для магистров / Сост. А.В. Ершов, А.И. Машин. - Н. Новгород, ННГУ, 2007. - 36 с.

Практикум включает в себя: теоретическое изучение физических принципов работы многослойных интерференционных покрытий, их назначение и классификация, требования к оптическим покрытиям; практическое освоение методов расчета и проектирования многослойных интерференционных покрытий; практическое освоение технологических приемов и навыков получения многослойных интерференционных оптических покрытий; практическое освоение методик спектрофотометрических измерений параметров сформированных покрытий; анализ полученных результатов, оформление отчетов о проделанной работе.

Рис. 17. Табл. 5.

Составители: канд. физ.-мат. наук, доцент А.В. Ершов
 докт. физ.-мат. наук, профессор А.И. Машин

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, доцент О.Н. Горшков

Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Развитие оптики многослойных тонкопленочных покрытий тесно связано с прогрессом в оптоэлектронике и квантовой электронике, оптическом приборостроении, спектроскопии и голографии. Интерференционные покрытия применяют для получения высоких коэффициентов отражения (зеркальные покрытия), для увеличения пропускания и контрастности (просветляющие покрытия), для спектрального и энергетического разделения и сложения оптических сигналов и их хроматической коррекции (узко- и широкополосные отрезающие фильтры), для изменения поляризации излучения (интерференционные поляризаторы).

В последние годы достигнуты значительные успехи в разработке методов получения многослойных интерференционных покрытий по тонкопленочной технологии. Наряду с традиционными методами термического резистивного испарения в вакууме, широкое распространение получил метод электроннолучевого испарения, позволяющий получать пленки и покрытия на основе тугоплавких оксидов металлов и полупроводников.

Основная цель настоящего практикума заключается в теоретическом и практическом изучении основ разработки интерференционных оптических покрытий и их получение методом электроннолучевого испарения в вакууме.

Формирование интерференционного покрытия можно условно разделить на два этапа. *На первом этапе определяется конструкция покрытия* (число и очередность слоев, их толщина и оптические постоянные), обеспечивающая необходимую оптическую характеристику покрытия. *Второй этап заключается в технологической реализации* – изготовлении покрытия. Условность указанного разделения связана с тем, что уже на этапе конструирования покрытия необходимо учитывать технические возможности его изготовления: наличие и свойства материалов, особенности технологической и контрольно-измерительной аппаратуры и др., – и, как правило, требуется технологическая проработка, в ходе которой нередко оказывается необходимым проведение дополнительных расчетов с целью корректировки первоначальной конструкции.

При *конструировании* покрытий решаются две задачи. Первая состоит в нахождении фазовых и энергетических характеристик многослойной системы при заданных параметрах ее конструкции – таких, как число слоев, их оптические постоянные и толщина, диапазон длин волн и углов падения излучения. Эта задача называется *задачей анализа*, и ее можно решить без особых затруднений, исходя из принципов электродинамики, при некоторых ограничениях для конструкции покрытия [1]. Определение спектров отражения и пропускания многослойной системы сводится к решению граничной задачи, т. е. к определению векторов напряженностей электрического и магнитного полей на всех границах слоев. В этом случае математическая модель покрытия обеспечивает достаточно полный учет интерференционных и поляризационных эффектов в многослойных системах всех типов [2].

Для практики гораздо больший интерес представляет решение второй, обратной задачи, которая называется *задачей синтеза* покрытия. Она состоит в определении конструктивных параметров покрытия, обеспечивающих достижение требуемой (заданной) оптической характеристики покрытия. Решение задачи синтеза сопряжено с типичными для обратных задач трудностями, связанными с необходимостью решения систем нелинейных уравнений, аналитическое решение которых удается получить только при специальных ограничениях, налагаемых на многослойную структуру. Наиболее приемлемым подходом синтеза покрытия является использование приближенных методов, основанных на *оптимизации* характеристик покрытия при введении некоторого численно выраженного критерия качества. Таким образом, задача синтеза формулируется в виде задачи минимизации некоторой нелинейной функции, определенной множеством допустимых параметров многослойной системы. Ввиду обычно высокой сложности и большого числа параметров нелинейной функции, синтез сложных покрытий (более 6 слоев [3]) весьма затруднен. Параметры слоев, получаемых в результате синтеза, очень часто оказываются недостижимыми практически.

При конструировании сложных покрытий преодоление указанных трудностей достигается при комбинировании подходов анализа и синтеза [2], примерная схема которого приведена на рис. 1.

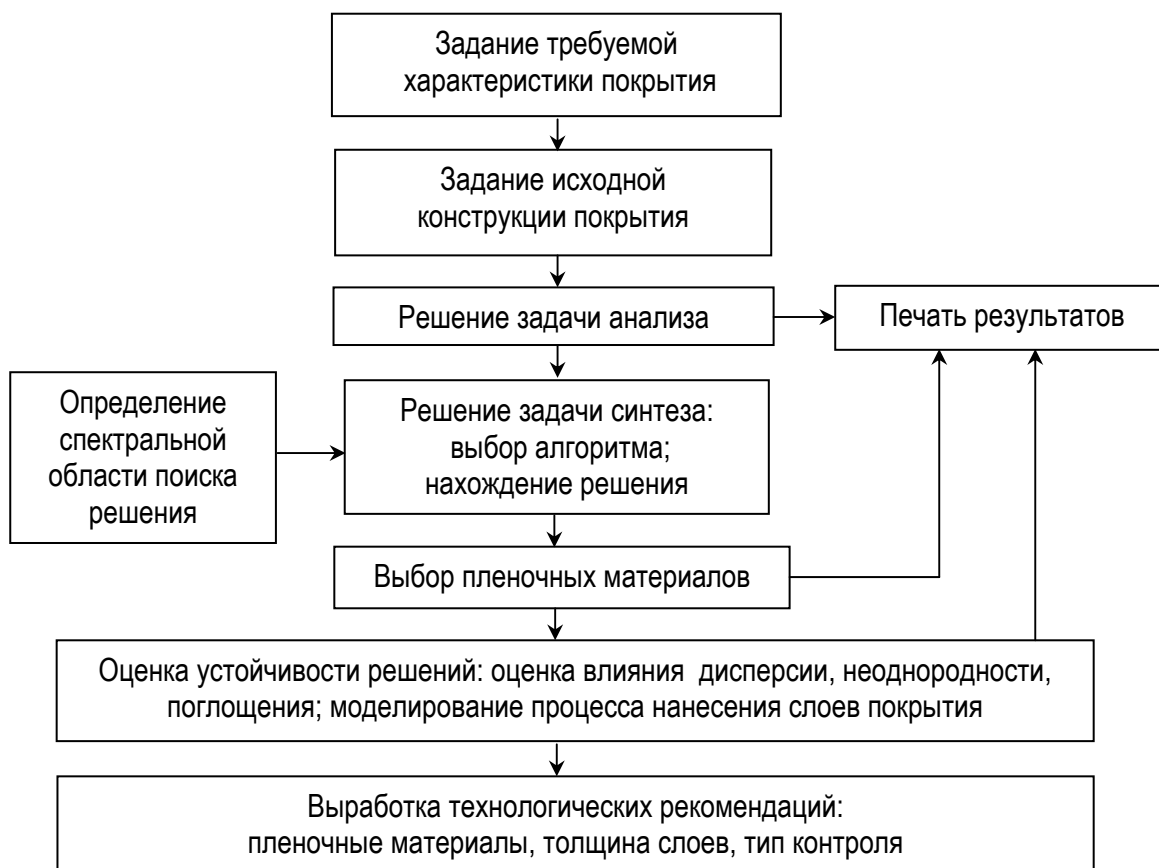


Рис. 1. Блок-схема проектирования сложных интерференционных покрытий

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Знание закономерностей распространения излучения в плоских многослойных системах необходимо при определении их оптических характеристик – таких, как величина и дисперсия оптических постоянных, оптическая толщина и др. Кроме того, свойства некоторых интерференционных систем также определяются аналогичными закономерностями.

Световая волна, падающая на плоскопараллельную структуру, расщепляется на каждой из границ раздела на прошедшую и отраженную волны, в результате чего в системе возникают многократные отражения. Точный расчет оптических характеристик всей системы сводится к корректному учету этих многократных отражений. Будем рассматривать случай только когерентных волн, для которых результат многократных отражений рассчитывается путем суммирования их амплитуд с учетом разности фаз между ними. Амплитуды суммируемых волн зависят от коэффициентов отражения и пропускания границ раздела, а эти коэффициенты в самом общем случае могут быть определены по формулам Френеля, т. е. вне зависимости от физической природы границы раздела [4, 5].

При расчете простейшей слоистой структуры, состоящей из двух границ раздела, учет многократных отражений легко проводится лучевым методом. Смысл его заключается в прослеживании прохождения каждого луча во всех последовательных актах отражения и пропускания, а также учитывается интерференция всех образующихся при этом разделенных лучей. Метод сложения лучей многократных отражений становится малоэффективным при расчете многослойной структуры. В связи с этим целесообразно использовать матричную формулировку законов распространения излучения в слоистой среде.

Границу раздела будем характеризовать [5] следующими величинами (рис. 2): r_{12} – амплитудный коэффициент отражения, т. е. отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей; t_{12} – амплитудный коэффициент пропускания, т. е. отношение амплитуды прошедшей волны к амплитуде падающей.

Порядок следования индексов определяет, с какой стороны на границу раздела падает волна.

Наряду с коэффициентом t_{12} целесообразно также определить коэффициент

$$\tau_{12} = \sqrt{\frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1}} t_{12}.$$

Введение коэффициента τ_{12} связано со следующим обстоятельством. Средняя по времени величина плотности потока лучистой энергии через единицу площади определяется соотношением $I = (c/2\pi)nE_0^2$. Учитывая, что

площади сечений падающей и отраженной волн пропорциональны $\cos \theta_1$ (рис. 2), для коэффициента отражения по потоку имеем:

$$R = I_r \cos \theta_1 / (I_0 \cdot \cos \theta_1) = I_r / I_0.$$

Отношение I_r/I_0 равно $n_1 E_r^2 / (n_1 E_0^2)$ и, следовательно, $R = E_r^2 / E_0^2 = r_{12}^2$.

Для прошедшей волны имеем:

$$T = \frac{I_t \cos \theta_2}{I_0 \cos \theta_1} = \frac{n_2 \cos \theta_2 E_t^2}{n_1 \cos \theta_1 E_0^2} = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n \cos \theta_1} t_{12}^2.$$

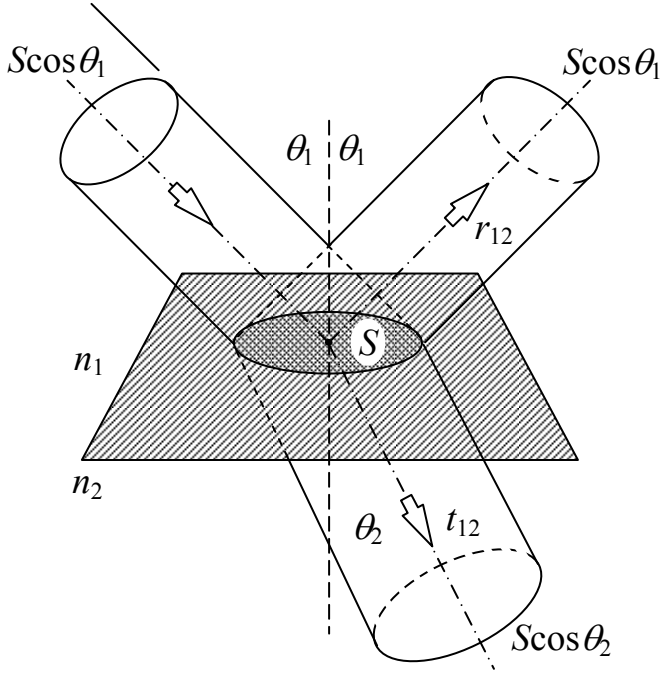


Рис. 2. Отражение волны от плоской границы раздела

Учитывая закон сохранения энергии, для потока через площадь S получим (рис. 2):

$$I_0 \cos \theta_1 = I_r \cos \theta_1 + I_t \cos \theta_2.$$

Приняв во внимание предыдущее рассуждение, найдем, что

$$\left(\frac{E_r}{E_0}\right)^2 + \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \left(\frac{E_t}{E_0}\right)^2 = 1,$$

т. е. $r_{12}^2 + \tau_{12}^2 = 1$.

Матричная формулировка отражения и пропускания на границе раздела наиболее просто получается, если вместо величин r_{12} и τ_{12} ввести величины

$$a_{12} = r_{12}/\tau_{12}, \quad b_{12} = 1/\tau_{12}.$$

Тогда связь между r_{12} и τ_{12} запишется в виде матричного равенства:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ r_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{12} & a_{12} \\ a_{12} & b_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{12} \\ 0 \end{bmatrix} = I_{12} \begin{bmatrix} \tau_{12} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В равенстве (1) вектор $[1, r_{12}]$ характеризует волну в первой среде, состоящую из падающей волны единичной амплитуды и отраженной с амплитудой r_{12} . Вектор $[\tau_{12}, 0]$ определяет прошедшую волну с амплитудой τ_{12} . Матрица I_{12} в равенстве (1) определяет свойства границы раздела, она унитарна (ее определитель равен единице), т. е. $b_{12}^2 - a_{12}^2 = 1$. Учитывая последнее соотношение, можно ввести также вспомогательную величину ν по формулам $a_{12} = \text{sh } \nu_{12}$, $b_{12} = \text{ch } \nu_{12}$ и $\nu_{12} = \frac{1}{2} \ln[(1 + r_{12})/(1 - r_{12})]$. Матрицу в равенстве (1) I_{12} будем называть *матрицей границы раздела*.

Система с двумя границами раздела представлена на рис. 3. Посредством суммирования многократно отраженных волн можно получить следующие выражения для r_{13} и τ_{13} :

$$r_{13} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-i2\varphi_2)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-i2\varphi_2)}; \quad \tau_{13} = \frac{\tau_{12}\tau_{23} \exp(-i2\varphi_2)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-i2\varphi_2)}. \quad (2)$$

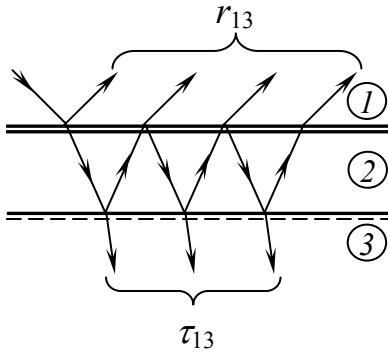


Рис. 3. Интерференция волн в слоистой структуре с двумя границами раздела между средами 1, 2 и 3

В выражениях (2) r_{12} , r_{23} , τ_{12} , τ_{23} означают соответствующие амплитудные коэффициенты отражения и пропускания границ раздела, а $\varphi_2 = 2\pi n_2 d_2 / \lambda$, где d_2 – геометрическая толщина слоя 2.

Матричное равенство, аналогичное равенству (1) здесь выглядит так:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ r_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{13} & a_{13} \\ a_{13} & b_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{13} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

С учетом выражений (2) для элементов матрицы в равенстве (3) имеем:

$$\left. \begin{aligned} a_{13} &= r_{13} / \tau_{13} = a_{12} b_{23} \exp i\varphi_2 + b_{12} a_{23} \exp -i\varphi_2; \\ b_{13} &= 1 / \tau_{13} = b_{12} b_{23} \exp i\varphi_2 + a_{12} a_{23} \exp -i\varphi_2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Матрицу (3) можно записать в виде тройного произведения:

$$s = \begin{bmatrix} b_{13} & a_{13} \\ a_{13} & b_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{12} & a_{12} \\ a_{12} & b_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp i\varphi_2 & 0 \\ 0 & \exp -i\varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{23} & a_{23} \\ a_{23} & b_{23} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Из соотношения (5) следует, что матрица s , определяющая действие системы с двумя границами раздела, является произведением трех матриц, две из которых (первая и последняя) характеризуют действие границ раздела, а средняя – действие слоя между границами раздела. Обозначим среднюю матрицу через M – она называется *матрицей слоя* или *матрицей набега фазы*. Таким образом, имеем:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ r_{13} \end{bmatrix} = I_{12} M_2 I_{23} \begin{bmatrix} \tau_{13} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Следует помнить, что матричное произведение не коммутативно и его следует выполнять в той последовательности, в которой волна падает на границы раздела. Кроме того, как произведение матриц, так и каждая матрица в отдельности являются унимодулярными. Это свойство является следствием закона сохранения энергии.

Соотношение (6) обобщается на случай структуры с произвольным числом слоев [5]. Если имеем, например, структуру, представленную на рис.

4, то амплитудный коэффициент отражения $r_{1,N+1}$ и амплитудный коэффициент пропускания $\tau_{1,N+1}$ связаны матричным равенством:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ r_{1,N+1} \end{bmatrix} = I_{12} M_2 I_{23} M_3 I_{34} \dots I_{N-1,N} M_N I_{N,N+1} \begin{bmatrix} \tau_{1,N+1} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Из равенства (7) можно получить явные выражения для $r_{1,N+1}$ и $\tau_{1,N+1}$ при любом числе слоев структуры, но такие явные выражения в большинстве случаев не представляют практической ценности. Расчеты в конкретных случаях целесообразней выполнять, используя рекуррентные формулы. Анализ же общего случая обычно осуществляется путем преобразования матрицы в (7) к более удобному виду. Рассмотрим эти возможности.

Рекуррентные соотношения можно вывести следующим образом. Используя формулы типа (2) для двух границ раздела, можно рассчитать случай трех границ раздела (рис. 5). Последовательность расчета такая же, как при получении формулы (2).

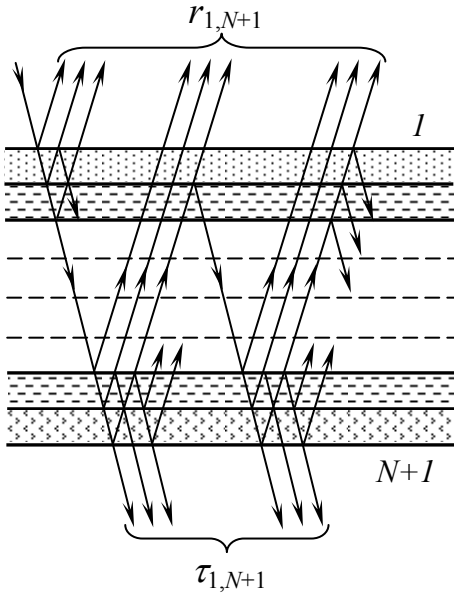


Рис. 4. Интерференция волн в слоистой структуре с несколькими границами раздела

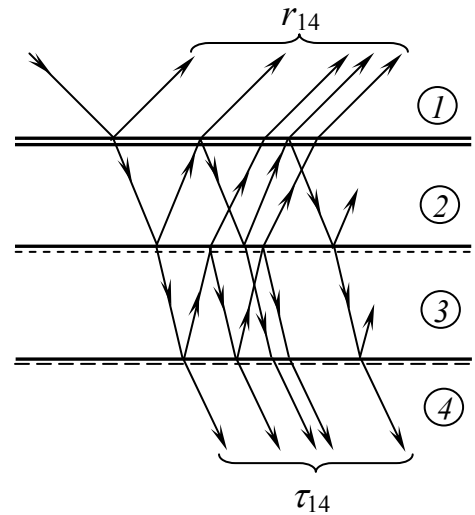


Рис. 5. Интерференция волн в слоистой структуре с тремя границами раздела между средами 1, 2, 3 и 4

Если представить, что первый слой играет роль первой поверхности на рис. 3, можно записать:

$$\left. \begin{aligned} r_{14} &= \frac{r_{13} + (\tau_{13}\tau_{31} - r_{13}r_{31}) \exp(-i2\varphi_3)}{1 - r_{31}r_{34} \exp(-i2\varphi_3)}; \\ \tau_{14} &= \frac{\tau_{13}\tau_{34} \exp(-i\varphi_3)}{1 - r_{31}r_{34} \exp(-i2\varphi_3)}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Приняв, что второй слой на рис. 5 играет роль второй поверхности рис. 3, получим вместо формул (8):

$$\left. \begin{aligned} r_{14} &= \frac{r_{12} + (\tau_{12}\tau_{21} - r_{12}r_{21}) \exp(-i2\varphi_2)}{1 - r_{21}r_{23} \exp(-i2\varphi_2)}; \\ \tau_{14} &= \frac{\tau_{12}\tau_{24} \exp(-i\varphi_2)}{1 - r_{21}r_{23} \exp(-i2\varphi_3)}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Обобщая соотношения (8) и (9), можно ввести в рассмотрение коэффициенты пропускания и отражения для любого числа слоев и границ раздела, а именно:

$$\left. \begin{aligned} r_{m,N+1} &= \frac{r_{m,N+1} + r_{m+1,N+1} \exp(-i2\varphi_{m+1})}{1 + r_{m,m+1}r_{m+1,N+1} \exp(-i2\varphi_{m+1})}; \\ \tau_{m,N+1} &= \frac{\tau_{m,m+1}\tau_{m+1,N+1} \exp(-i\varphi_{m+1})}{1 + r_{m,m+1}r_{m+1,N+1} \exp(-i2\varphi_{m+1})}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Введем величины $a_{m,N+1} = r_{m,N+1}/\tau_{m,N+1}$ и $b_{m,N+1} = 1/\tau_{m,N+1}$ и аналогично $a_{m,m+1}$, $b_{m,m+1}$. Формулы (10) можно переписать в эквивалентной форме:

$$\left. \begin{aligned} a_{m,N+1} &= a_{m,m+1}b_{m+1,N+1} \exp i\varphi_{m+1} + a_{m+1,N+1}b_{m,m+1} \exp -i\varphi_{m+1}; \\ b_{m,N+1} &= b_{m,m+1}b_{m+1,N+1} \exp i\varphi_{m+1} + a_{m,m+1}a_{m+1,N+1} \exp -i\varphi_{m+1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Соотношения (11) можно записать в матричной форме:

$$F_{m,N+1} = F_{m,m+1}M(\varphi_{m+1})F_{m+1,N+1}, \quad (12)$$

где

$$M(\varphi_{m+1}) = \begin{bmatrix} e^{i\varphi_{m+1}} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_{m+1}} \end{bmatrix}; \quad F_{ik} = \begin{bmatrix} b_{ik} & a_{ik} \\ a_{ik} & b_{ik} \end{bmatrix}$$

Матричная запись (12) из соотношений (11) получается аналогично тому, как запись (5) следует из соотношений (4).

Формула (12) имеет рекуррентный характер, т. е. позволяет последовательно, начиная с $m = N + 1$, вычислять матрицы $F_{m,N+1}$, используя полученный результат в дальнейших вычислениях. Матричная запись позволяет также представить в компактной форме общую формулу

$$F_{1,N+1} = F_{12}M_2F_{23}M_3F_{34} \dots F_{N-1,N}M_NF_{N,N+1}.$$

Таким образом, рассмотрен метод расчета многоэлементной плоскостройной структуры. Можно было бы получить явные формулы вида (12) для различного числа слоев, но они не представляют практической ценности ни с точки зрения вычислений, ни для анализа физической картины явления [5]. Наглядная физическая интерпретация явных формул может быть получена лишь в немногих частных случаях. Очевидно, что физика явлений для рассматриваемых структур связана с интерференцией многих лучей различной

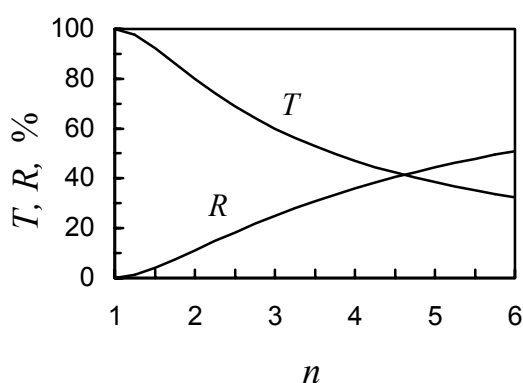
интенсивности и с разными фазами. Расчет результата их интерференции легко программируется и выполняется на ЭВМ.

Далее рассмотрим конкретные типы покрытий, которые в настоящее время широко применяются в приборах оптоэлектроники.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ

Просветление поверхностей элементов оптических систем используется по двум причинам. *Во-первых*, – для уменьшения потерь интенсивности падающего излучения на отражение, т. е. увеличения пропускной способности оптического элемента. Это особенно актуально сейчас при разработке различных фотоприемных устройств, в частности солнечных элементов. *Во-вторых*, если на плоскость изображения попадает свет, претерпевший многократные отражения от поверхностей элементов (так называемые “блики”), то это приводит к уменьшению контраста и четкости изображения. Создание антибликовых покрытий за счет их просветления особенно актуально при разработке устройств отображения информации: электровакуумных мониторов, кинескопов, а также *входных* оптических систем фото-, видеоаппаратуры и оптоэлектронных устройств, включая интегральные [6].

На рис. 7 приведены зависимости вычисленного по формуле Френеля [4] коэффициента отражения R на границе раздела сред воздух–вещество и коэффициента пропускания T плоскопараллельной пластинки из того же вещества от показателя преломления вещества n . Этот рисунок красноречиво показывает, насколько велики могут быть потери на отражение оптических систем из различных материалов, которые в реальных случаях могут быть гораздо выше для более чем одной пластины из разных веществ.



$$T = \frac{1 - R}{1 + R};$$

$$R = \left(\frac{1 - n}{1 + n} \right)^2$$

Рис. 7. Зависимости пропускания T пластины, вычисленного сложением интенсивностей, и отражения R одной поверхности от показателя преломления пластины n

Элементы теории проектирования просветляющих покрытий

Далее будем считать, что рассматриваемые просветляющие покрытия и подложки не поглощают свет в соответствующей области спектра. Для расчета примем также систему обозначений для многослойной оптической сис-

темы с показателями преломления и коэффициентами отражения Френеля, как изображено на рис. 8.

Показатели преломления окружающей среды и подложки обозначены через n_0 и n_s , соответственно, а слои нумеруются по порядку от наружного слоя к подложке. Величины r и n - вещественные числа, т. к. поглощением пренебрегаем. Не учитываем также дисперсию оптических постоянных.

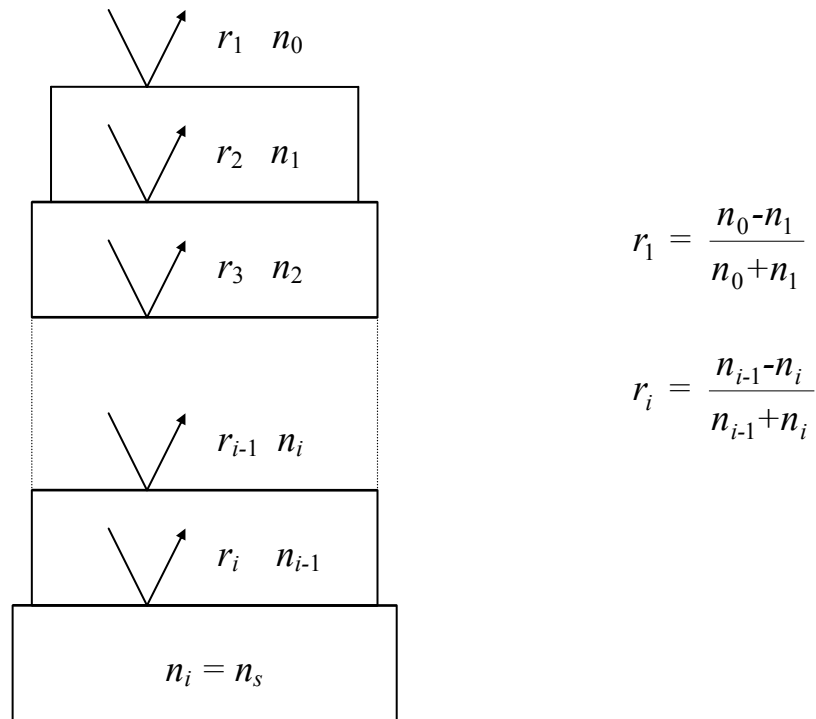


Рис. 8. Обозначения, принятые для коэффициентов Френеля r и показателей преломления, используемые для расчета просветляющих покрытий

1. Однослойное просветляющее покрытие

Однослойные просветляющие покрытия являются простейшими как для расчета, так и при их изготовлении, и вместе с тем наиболее часто используются на практике [7]. Если свет падает нормально на прозрачную среду, покрытую одним прозрачным слоем, то амплитуда отраженного света характеризуется коэффициентом отражения:

$$r = \frac{r_1 + r_2 \exp(-2i\varphi_1)}{1 + r_1 r_2 \exp(-2i\varphi_1)}, \quad (13)$$

где $i = \sqrt{-1}$ и $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 / \lambda$, d_1 - геометрическая толщина слоя.

Для просветляющего покрытия $r \rightarrow 0$, а знаменатель в (13) не может быть равен бесконечности. Приравнявая нулю действительную и мнимую части числителя, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} r_1 + r_2 \cdot \cos 2\varphi_1 = 0 & (14a) \\ r_2 \cdot \sin 2\varphi_1 = 0 & (14b) \end{cases}$$

Эта система имеет два решения. Если $2\varphi_1$ составляет целое число π , то $n_0 = n_s$. Это тривиальный случай. Более важен случай, когда $2\varphi_1$ составляет нечетное число π и $n_1^2 = n_0 n_s$. Таким образом, если $n_s \neq n_0$, необходимым и достаточным для однослойного покрытия будет:

$$n_1^2 = n_0 n_s \quad (15a)$$

$$\varphi_1 = (2m-1) \frac{\pi}{2}; \quad m = 1, 2, 3... \quad (15b)$$

Обычно на практике выбирают $m = 1$, и тогда оптическая толщина слоя $n_1 d_1 = \lambda/4$.

Зависимость интенсивности отраженного света от φ_1 характеризуется коэффициентом $R = |r|^2$

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\varphi_1}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\varphi_1}. \quad (16)$$

Если $n_1 d_1 = \lambda/4$ (т.е. $\varphi_1 = \pi/2$), выражение (16) имеет вид:

$$R_{\lambda/4} = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_s}{n_1^2 + n_0 n_s} \right)^2 \quad (17)$$

$R_{\lambda/4} = 0$ при $n_1^2 = n_0 n_s$. Если (15a) не выполняется, то выражение (17) дает значение функции (16) в ее экстремуме. Значение R в экстремуме зависит от того, насколько нарушается условие (15a). Графически влияние степени нарушения условия (15a) на величину R можно проиллюстрировать рисунком 9.

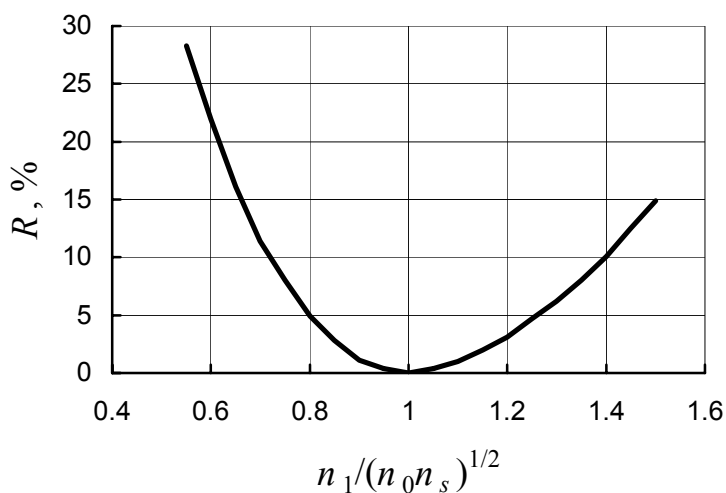


Рис. 9. Отражение от прозрачной подложки, покрытой одним слоем оптической толщины $\lambda/4$

2. Двухслойные покрытия

Чтобы получить амплитудный коэффициент отражения двухслойного покрытия, обратимся опять к решению уравнения (13), а покрытие будет выглядеть, как на рис. 8, где $i = 3$, $n_i = n_s$. В этом случае получим следующие два выражения:

$$r = \frac{r_1 e^{i\varphi_1} + r' e^{-i\varphi_1}}{e^{i\varphi_1} + r_1 r' e^{-i\varphi_1}} \quad (18a)$$

$$r' = \frac{r_2 e^{i\varphi_2} + r_3 e^{-i\varphi_2}}{e^{i\varphi_2} + r_2 r_3 e^{-i\varphi_2}}, \quad (18б)$$

где r - амплитудный коэффициент отражения двухслойного покрытия на подложке;

r' - амплитудный коэффициент отражения подложки с одним лишь внутренним слоем при падении света из среды с показателем n_1 .

После подстановки (18б) в (18a) вещественная и мнимая части числителя приравняются нулю, в результате имеем два уравнения:

$$(r_1 + r_3) \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + r_2(1 + r_1 r_3) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \quad (19a)$$

$$(r_1 - r_3) \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - r_2(1 - r_1 r_3) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \quad (19б)$$

Эти два уравнения имеют гораздо более широкую область решений, чем система уравнений (14).

Ниже рассмотрим частный случай, когда отношение φ_1 к φ_2 равно целому числу, а затем снимем это ограничение.

Коэффициент отражения $R = |r|^2$ из (18) имеет вид:

$$R = \frac{1}{A} \left[r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_1^2 r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\varphi_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos 2\varphi_2 + \right. \\ \left. + 2r_1 r_3 \cos 2(\varphi_1 + \varphi_2) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos 2(\varphi_1 - \varphi_2) \right]$$

где

$$A = 1 + r_1^2 r_2^2 + r_1^2 r_3^2 + r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\varphi_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos 2\varphi_2 + \\ + 2r_1 r_3 \cos 2(\varphi_1 + \varphi_2) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos 2(\varphi_1 - \varphi_2)$$

а) Два слоя с одинаковыми оптическими толщинами ($n_1 d_1 = n_2 d_2$)

Если $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, уравнения (19) дают следующие три решения:

$$1) n_0 = n_s \quad (20a)$$

$$\varphi = m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (20б)$$

Это решение описывает тривиальный случай двойного слоя между одинаковыми средами; толщина каждого слоя кратна $\lambda/2$.

$$2) n_1^2 n_s = n_2^2 n_0 \quad (21a)$$

$$\varphi = (2m-1)\pi/2, \quad m = 1, 2, 3... \quad (21б)$$

Это решение описывает важный тип двухслойного покрытия, дающего нулевое отражение, когда оптическая толщина каждого слоя составляет нечетное число $\lambda/4$.

Если условие (21a) не выполняется для рассматриваемого случая и $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda/4$, то:

$$R_{\lambda/4} = \left(\frac{n_1^2 n_s - n_2^2 n_0}{n_1^2 n_s + n_2^2 n_0} \right)^2 \quad (22)$$

дает минимальное (не равное нулю) значение отражения. Это соотношение может быть представлено аналогично рис. 9, кроме того, нетрудно получить полное совпадение кривых как в этом случае, так и для однослойного, если по оси абсцисс графика рис. 9 $n_1/\sqrt{n_0 n_s}$ заменить на $n_1 \sqrt{n_s}/n_2 \sqrt{n_0}$.

Зависимость отражения от толщины является также практически важной с точки зрения контроля толщины пленок при их нанесении. По данным рис. 10 можно судить о степени влияния рассогласования толщин пленок на коэффициент отражения двухслойного покрытия с конкретными показателями преломления. Из графика следует, что отражение очень чувствительно к изменению толщины слабо преломляющих пленок и сравнительно нечувствительно к вариациям сильно преломляющих слоев. Следовательно, для данной конструкции покрытия очень важно нанести однородную по толщине (равной $\lambda/4$) пленку с низким значением n .

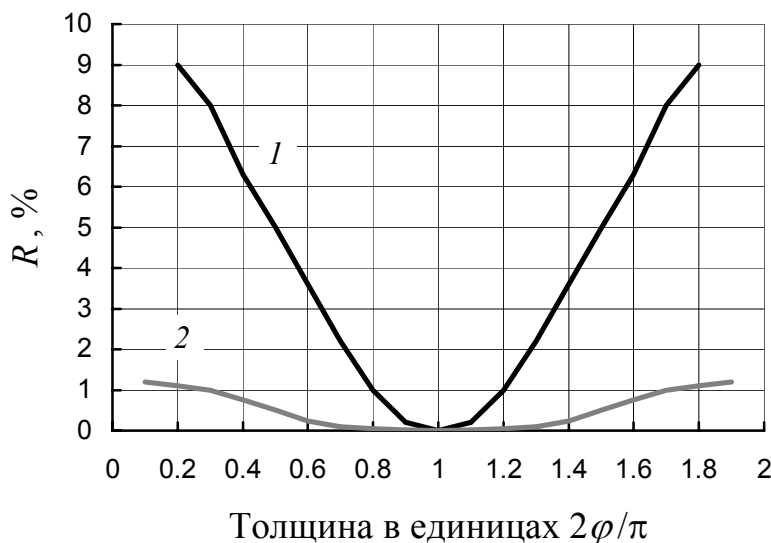


Рис. 10. Влияние рассогласования толщин на отражение R двухслойного покрытия на стекле ($n_1 = 1.38$, $n_2 = 1.70$, $n_s = 1.51$);
 1 – $\varphi_2 = \pi/2$; φ_1 изменяется;
 2 – $\varphi_1 = \pi/2$; φ_2 изменяется

3) Для покрытия из двух пленок равной толщины можно получить более широкую спектральную область пониженного отражения, если показатели преломления удовлетворяют условию:

$$n_1 n_2 = n_0 n_s. \quad (23a)$$

Толщины слоев рассчитываются по формуле

$$\cos 2\varphi = \frac{(n_2 - n_1)(n_0^2 + n_1^2)}{(n_2 + n_1)(n_0^2 - n_1^2)}, \quad (23б)$$

которая может быть преобразована к виду:

$$\operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{n_1^2 n_2 - n_0^2 n_1}{n_1^3 - n_0^2 n_2}. \quad (23в)$$

Если $n_1 < n_2$ и $n_0 < n_1$, то $\cos 2\varphi$ согласно (23б) становится отрицательным, и в этом случае существуют два решения между 45 и 135° . Для обоих решений коэффициент отражения равен нулю, если одновременно выполняется условие (23а).

б) Оптическая толщина нижнего слоя в два раза выше, чем толщина верхнего слоя

Если $\varphi_2 = 2\varphi_1$, то уравнения (19) имеют еще три решения.

$$\begin{aligned} 1) \quad & n_0 = n_s \\ & \varphi_1 = m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Это тривиальное решение аналогично случаю, рассмотренному выше (см. формулы (20)).

$$\begin{aligned} 2) \quad & n_1^2 = n_0 n_s \\ & \varphi_1 = (2m-1)\pi/2, \quad m = 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

Опыт расчетов и изготовления таких покрытий показывает, что их применение менее эффективно по сравнению с однослойными покрытиями и интереса не представляет.

$$3) \quad n_2^3 - \frac{1}{2} \frac{n_2 n_3}{n_0 n_1} (n_0^2 + n_1^2) (n_1 + n_2) + n_1 n_s^2 = 0 \quad (24a)$$

$$\cos^2 \varphi_1 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(n_0 + n_1)(n_1 n_s - n_2^2)}{(n_0 - n_1)(n_1 + n_2)(n_2 + n_s)} \right] \quad (24б)$$

Простейшим и самым распространенным примером такого покрытия является покрытие, наружный и внутренние слои которого имеют оп-

тические толщины $\lambda_0/4$ и $\lambda_0/2$, соответственно [8], на длине волны λ_0 . На этой длине волны отражение имеет максимум, определяемый выражением (17), и является отражением только одного внешнего слоя на подложке, не зависит от n_2 , так как $n_2 d_2 = \lambda_0/2$. Коэффициент отражения такого покрытия имеет два минимума, положение которых определяется из (24б). В этих минимумах, расположенных по обе стороны от λ_0 , отражение обращается в нуль, если показатели преломления удовлетворяют уравнению (24а).

На рис. 11 приведены спектральные зависимости коэффициентов отражения покрытий $\lambda/4 - \lambda/2$ на стекле. Для всех покрытий $n_1 = 1.38$, $n_s = 1.51$, n_2 меняется от 1.6 до 2.4. Видим, что при возрастании n_2 до 1.85 отражение в минимумах падает до нуля, когда выполняется условие (24а), а затем увеличивается до 1.15 % при $n = 2.4$. Расстояние между минимумами уменьшается с ростом n_2 , и при больших n_2 минимумы сливаются в один. Максимум при 500 нм соответствует отражению однослойного покрытия из пленки толщиной $\lambda/4$ с $n_1 = 1.38$ на подложке $n_s = 1.52$. Таким образом, в интервале длин волн 370 - 760 нм коэффициент отражения двухслойного покрытия $\lambda/4 - \lambda/2$ при $n_2 = 1.85$ меньше, чем коэффициент отражения однослойного покрытия.

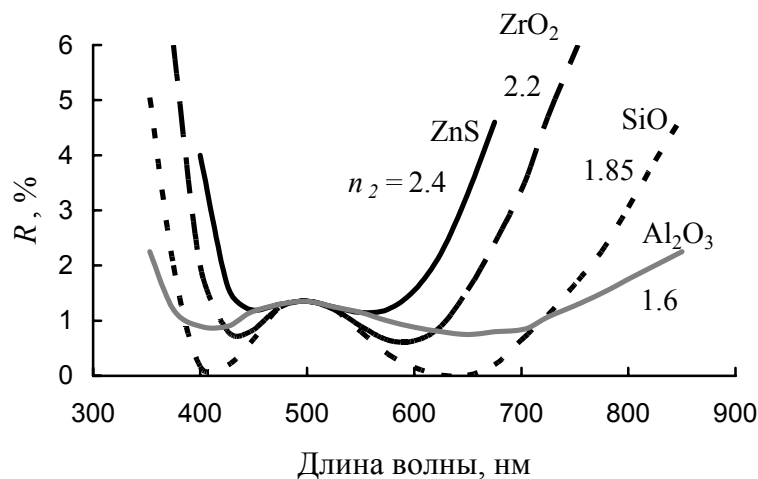


Рис. 11. Спектральная зависимость отражения R двухслойных покрытий $\lambda/4 - \lambda/2$ на стекле ($n_1 = 1.38$, $n_s = 1.51$) для n_2 равного от 1.6 до 2.4

3. Трехслойные покрытия

Более широкая область спектра с низким отражением может быть получена при использовании трехслойных покрытий. Математический анализ свойств таких покрытий очень сложен. Поэтому здесь ограничимся рассмотрением некоторых из наиболее важных и простых типов, для которых толщина каждого слоя кратна $\lambda/4$. Три относительно простые трехслойные системы могут служить эффективными просветляющими покрытиями.

а) Толщина каждого слоя равна $\lambda_0/4$

Здесь λ_0 - контролируемая длина волны.

$$1) n_1 n_3 = n_2^2 = n_0 n_s \quad (25)$$

При выполнении этого условия имеется три нулевых максимума отражения: один - на λ_0 и по одному - с каждой стороны от λ_0 . Боковые экстремумы даются выражением:

$$\operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{n_0 (n_0 - n_s) n_1^2}{2\sqrt{n_0 n_s} (n_0^2 - n_1^2) n_1 + (n_0^3 n_s - n_1^4)} \quad (26)$$

Если в (25) $n_0 = 1$, то $n_2^2 = n_0 n_s$ и либо n_1 , либо n_3 должны быть меньше или равны $\sqrt{n_s}$. Следовательно, данная система не применима для просветления низкопреломляющих материалов (стекло, кварц), но является очень эффективной для просветления материалов с высоким n_s (*Si, Ge, ZnS, As₂S₃* и т. п.). Покрyтия, изготовленные по такому “ступенчатому” типу, обеспечивают очень широкую область малого отражения (рис. 12).

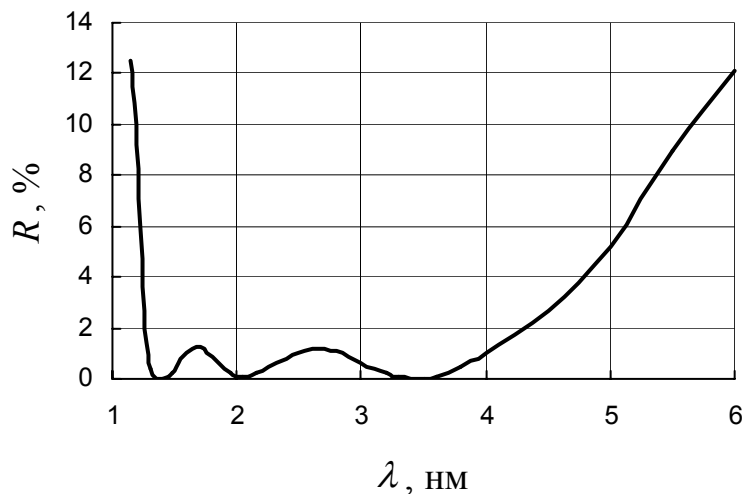


Рис. 12. Спектральная зависимость R для покрытия $\lambda_0/4 - \lambda_0/4 - \lambda_0/4$ на германии ($n_1 = 1.35$, $n_2 = 2.0$, $n_3 = 2.96$, $n_s = 4.0$)

$$2) n_1 n_3 = n_2 \sqrt{n_0 n_s} \quad (27)$$

Это соотношение является просто обобщением случая **1**), так как здесь n_2 не обязательно должен быть равным $\sqrt{n_0 n_s}$. Такой более широкий выбор n_2 позволяет использовать в качестве просветляющей систему $\lambda_0/4 - \lambda_0/4 - \lambda_0/4$ для стекла. Однако в этом случае $R = 0$ лишь на λ_0 .

б) Толщина внешнего слоя - $\lambda/4$, среднего - $\lambda/2$, внутреннего - $\lambda/4$

Отражение такого покрытия будет равно нулю, если показатели преломления удовлетворяют условию:

$$n_1^2 n_s = n_3^2 n_0 \quad (28)$$

в) Толщина внешнего слоя - $\lambda/4$, среднего - $\lambda/2$, внутреннего - $3\lambda/4$

В этом случае для получения нулевого отражения показатели преломления должны удовлетворять тому же условию (28). Однако спектральная зависимость данной системы имеет более широкий диапазон просветления. С другой стороны, за обеими границами области низкого отражения рост R значительно выше, чем в предыдущем случае.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЗЕРКАЛА И ФИЛЬТРЫ

Зеркальные интерференционные покрытия применяются с целью увеличения коэффициента отражения в определенном интервале длин волн. Конструктивно они менее разнообразны, чем просветляющие покрытия. Как правило, зеркала состоят из четвертьволновых или кратных им по толщине чередующихся пленок с высоким и низким показателями преломления. Коэффициент отражения такой многослойной системы зависит от разницы в показателях преломления чередующихся слоев и их числа и может превышать 99.5 %. Диэлектрические зеркала, имеющие пренебрежимо малый коэффициент поглощения, успешно конкурируют с металлическими зеркалами, у которых поглощение может достигать 25–30 %. Кроме того, многослойные покрытия на основе таких материалов, как тугоплавкие оксиды, обладают более высокой химической устойчивостью и механической прочностью по сравнению с широко применяемыми пленками алюминия и серебра.

Определенные трудности встречаются при изготовлении широкополосных зеркал, т. е. зеркал с широкой областью высокого отражения. В этом случае можно использовать набор зеркал, нанесенных на одну подложку со смежными полюсами высокого отражения. Недостатком такого метода является необходимость нанесения большого числа слоев. Другой путь изготовления широкополосных зеркал заключается в нанесении большого числа чередующихся слоев, оптическая толщина которых монотонно изменяется по определенному закону. Такие покрытия очень чувствительны к точности нанесения слоев, поэтому при их реализации предъявляются высокие требования к методу контроля их толщины. Некоторого увеличения области высокого отражения можно достичь, увеличивая разницу в показателях преломления слоев, составляющих покрытие, но этот метод ограничен выбором материалов с необходимыми параметрами. Существуют работы [7], в которых решается проблема расчета и изготовления зеркал, имеющих две области высокого отражения. И если конструирование и реализация большинства описанных покрытий сравнительно несложны, то их применение в качестве зеркал лазерного резонатора может вызвать значительные трудности. В этом случае к ним предъявляются кроме высокого отражения такие требования, как низкие потери (т. е. потери на поглощение и рассеяние света) для лазеров с небольшим коэффициентом усиления, высокая лучевая прочность для

мощных лазеров и ряд других требований, которые, в конечном счете, определяют КПД и долговечность лазеров. Эти задачи решаются в каждом конкретном случае выбором материалов слоев и оптимальной технологии их нанесения.

Так, например, высокоотражающие покрытия на излучающих гранях полупроводниковых играют важную роль в уменьшении величины порогового тока накачки. Причем диэлектрические многослойники имеют преимущество перед металлическими зеркалами, т. к. они не разрушаются в процессе пайки кристалла к держателю и не шунтируют *p-n*-переход полупроводниковой структуры. Вследствие этого интерференционные зеркала изготавливают на основе пленок Si–Al₂O₃, Si–SiO₂, ZnS–MgF₂. Но перечисленные конструкции лазерных зеркал также не свободны от недостатков. Пленки Si обладают поглощением на длинах волн меньше 1 мкм, а их оптические свойства сильно зависят от условий напыления. Зеркала же на основе ZnS–MgF₂, изготовленные для ИК области спектра, подвержены растрескиванию из-за высоких растягивающих напряжений в пленках MgF₂.

В последние годы наибольшее распространение получили зеркала на основе TiO₂ – SiO₂ и ZrO₂ – SiO₂, причем предпочтение отдается обычно первой системе из-за более высокого показателя преломления TiO₂. Это позволяет формировать покрытия, состоящие из меньшего числа слоев. Однако, с точки зрения устойчивости к лазерному излучению, более эффективными являются зеркальные системы ZrO₂ – SiO₂. Об этом свидетельствуют данные табл. 1, где приведены результаты измерений порога разрушения указанных зеркал в зависимости от длины волны лазерного облучения при длительности импульсов 10–14 нс и диаметре светового пятна 120 мкм [9].

Таблица 1

Порог разрушения зеркальных покрытий

Материалы слоев зеркал	Число слоев	Длина волны, мкм	Порог разрушения, ГВт/см ²	
			Одиночный импульс	Множественное воздействие при частоте повторения импульсов 100 Гц
TiO ₂ – SiO ₂	14	1.32	2	1.5
	22	1.06	1.5	1
	20	0.53	1...1.5	0.3–0.4
ZrO ₂ – SiO ₂	17	1.32	2	2
	25	1.06	2	2
	17	0.53	2	2

Решение различных задач квантовой электроники требует создания покрытий, обладающих одновременно областями высокого пропускания и отражения в выделенных спектральных интервалах. Создание областей с высоким отражением проводится на основе периодических систем слоев с чередующимися высоким и низким показателями преломления. Для таких систем

характерно наличие побочных максимумов между областями высокого отражения. Подавление этих максимумов нередко позволяет получать хорошее приближение к искомой спектральной характеристике. Известны приемы как одностороннего, так и двухстороннего подавления побочных максимумов. Подавление побочных максимумов с коротковолновой или длинноволновой стороны от области высокого отражения позволяет получить *длинноволновые или коротковолновые отрезающие фильтры*.

Конструирование фильтрующих покрытий осуществляется либо машинными методами, либо на основе метода эквивалентного слоя. В обоих случаях периодическая система, формирующая область высокого отражения, дополняется согласующими слоями, параметры которых подбираются так, чтобы сгладить вторичные пики отражения в интересующем спектральном диапазоне.

Рассмотрим некоторые из этих покрытий. Например, описанная в работе [9] конструкция покрытия с малым коэффициентом отражения в коротковолновой полосе пропускания зеркала при произвольном выборе прозрачных сред, обрамляющих зеркало, имеет вид:

$$S \frac{C_1}{2} (BH \dots B) \frac{C_2}{2}.$$

Здесь S – подложка; знаки B и H обозначают четвертьволновые слои с высоким и низким показателями преломления; $C_1/2$ и $C_2/2$ – согласующие слои с оптическими толщинами, равными $\lambda_0/8$.

При изготовлении такого отрезающего фильтра следует иметь в виду, что область высокого пропускания является наиболее чувствительной к систематическому рассогласованию оптических толщин слоев, вызванному наличием дисперсии (разной у различных материалов) показателей преломления и ошибок, возникающих при сквозном контроле оптических толщин слоев. Это приводит к появлению характерной полосы повышенного отражения в области пропускания системы. Поэтому контроль толщины слоев целесообразно осуществлять в области $\lambda_0/\lambda = 2$ по изменению отраженного от покрытия сигнала.

Приходится также учитывать технологические факторы, влияющие на отклонение параметров покрытия от расчетных значений. Так, например, систематические ошибки в толщинах слоев могут быть связаны с неоптимальным расположением контрольной пластины и подложек относительно испарителей. Значения показателей преломления слоев могут заметно меняться в зависимости от метода испарения материалов и таких технологических параметров, как остаточное давление в вакуумной камере, температура подложек и др. Указанные отклонения могут приводить к значительному изменению спектральной характеристики даже при достаточно высокой точности устройства контроля оптической толщины слоев.

Перечисленные факторы учитывались при разработке технологии изготовления некоторых фильтрующих покрытий, предлагаемых ниже в качестве примера.

На рис. 13, *а* приведена расчетная спектральная характеристика фильтра. Остаточное отражение в полосе пропускания покрытия не превышает 1 % в диапазоне волн, по ширине равном видимой области спектра. Рассматриваемое покрытие экспериментально было получено методом испарения на основе оксидов $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$, и его спектральная характеристика была близка к расчетной [8]. Для работы в условиях воздействия лазерного излучения на длинах волн 0.53 и 1.06 мкм с повышенной плотностью мощности разработано покрытие на основе оксидов $\text{ZrO}_2 - \text{SiO}_2$. Покрытие состоит из 25 основных слоев с оптическими толщинами $\lambda_0/4$ и одним внешним согласующим слоем оптической толщиной $\lambda_0/8$. Покрытие обеспечивает получение коэффициента пропускания менее 0.3 % на волне 1.06 мкм и более 95 % на длине волны 0.53 мкм.

На рис. 13, *б* приведена спектральная характеристика покрытия, предназначенного для работы в системах с внутривибраторным преобразованием излучения с длиной волны 1.06 мкм во вторую гармонику. Покрытие выполнено из оксидов $\text{ZrO}_2 - \text{SiO}_2$. Коэффициент пропускания составляет 0.5 % на длине волны 0.53 мкм и 99 % на волне 1.06 мкм.

Для получения покрытий с высоким коэффициентом отражения в широкой области спектра на практике обычно применяют конструкции, состоящие из нескольких последовательно нанесенных зеркал со смещенными по спектру областями высокого отражения. На рис. 13, *в* приведена спектральная характеристика широкополосного зеркала для перестраиваемых лазеров на красителях. Покрытие состоит из 39 слоев $\text{ZrO}_2 - \text{SiO}_2$ и имеет следующую конструкцию: $S(BH)^{10}B(H'B')^3H'(B''H'')B''$. Максимумы отражения располагались на волне 0.7 мкм для слоев B и H , 0.65 мкм для слоев B' и H' и 0.6 мкм для слоев B'' и H'' . При разработке покрытия с таким большим числом слоев главной задачей повышения его качества было уменьшение потерь, связанных с рассеянием излучения. Выбранная конструкция покрытия с расположением более толстых слоев у подложки способствовала уменьшению рассеяния в 1.5–2 раза.

Дальнейший прогресс в области совершенствования параметров многослойных интерференционных зеркал и фильтров связан с автоматизацией процесса их нанесения, что предполагает стабилизацию основных параметров технологического процесса.

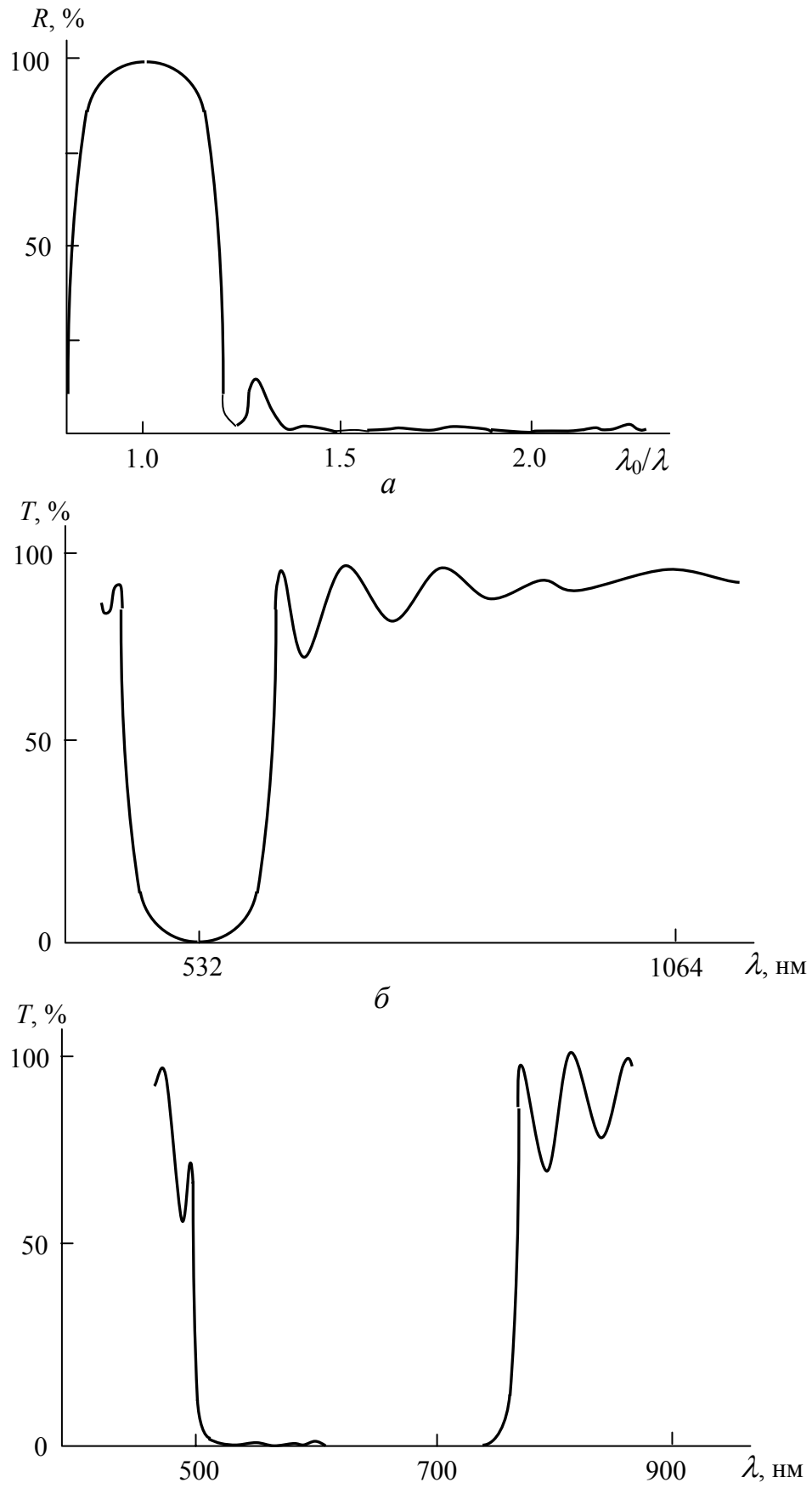


Рис. 13. Спектральная характеристика длинноволнового отрезающего фильтра (а), коротковолнового отрезающего фильтра (б) и широкополосного отражающего покрытия (в)

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ПОЛЯРИЗАТОРЫ

При создании интерференционных поляризаторов исходят из различия коэффициентов отражения (пропускания) p - и s -поляризованных компонент излучения (электрический вектор колеблется в плоскости падения и перпендикулярно ей) при наклонном падении света на слоистую систему [1, 2]. Это различие можно усилить, соответственно подбирая параметры пленочной системы, угол падения и показатели преломления сред, окаймляющих покрытие.

В настоящее время интерференционные поляризаторы широко применяются в лазерной технике, успешно конкурируя с кристаллическими и подчас полностью заменяя их. Основное преимущество кристаллических поляризаторов – *ахроматичность* – оказывается малосущественным для лазерных применений вследствие высокой монохроматичности лазерного излучения. Основной недостаток интерференционных поляризаторов – сильная угловая зависимость их оптических характеристик – компенсируется малой расходимостью излучения лазерных источников. Кроме того, они относительно недороги и пригодны для массового производства, так как их изготовление не требует дорогостоящего сырья.

Для поляризации лазерного излучения может быть использовано отражающее покрытие, состоящее из слоев с чередующимися высоким и низким показателями преломления четвертьволновой оптической толщины, ориентированное под углом к направлению распространения излучения [2, 9]. На рис. 14 приведены спектральные зависимости коэффициентов отражения различно поляризованных компонент излучения 15-слойного покрытия, состоящего из слоев ZnS и MgF₂, расположенного под углом 56°. Видно, что спектральная ширина области высокого отражения s -поляризованного излучения больше, чем p -поляризованного. Таким образом, длину волны лазерного излучения можно расположить так, что она попадает в область высокого отражения s -поляризованной компоненты и в область высокого пропускания p -поляризованной компоненты. В соответствии с рис. 14 контрольную длину волны λ_0 следует выбирать таким образом, чтобы длина волны лазерного излучения λ совмещалась с $\lambda_0/\lambda = 0.96$. В этом случае зеркало можно использовать как эффективный поляризатор.

Однако эта система оказывается весьма неустойчивой: при малых вариациях толщин слоев наблюдается заметное увеличение коэффициента отражения p -компоненты излучения. Расширить область отражения p -поляризованного излучения можно, сглаживая вторичный пик отражения, достигающий 30 %. Уменьшение этого пика отражения достигается оптимизацией характеристик покрытия путем вариации толщин слоев. Спектральная характеристика полученного в результате оптимизации отражающего покрытия приведена на рис. 14. Для получения более широкой спектральной области сохранения поляризующих свойств системы, следует выбирать пленочные материалы с возможно большим отношением показателей преломления. Поэтому рассматриваемые поляризаторы представляют наибольший интерес с

точки зрения их использования в ИК области спектра, для которой известны материалы с большим отношением показателей преломления.

$R_p, R_s, \%$

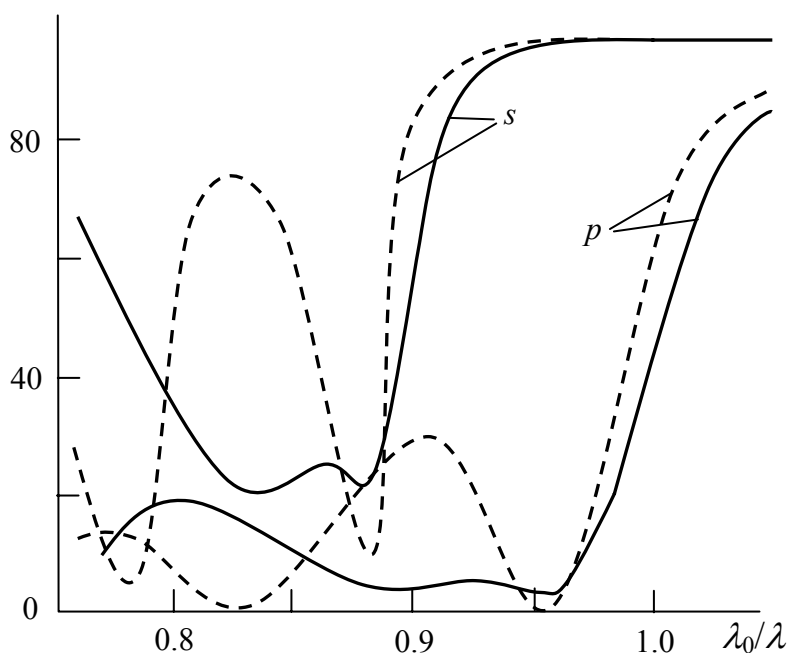


Рис. 14. Спектральные характеристики 15-слойного покрытия зеркального типа, ориентированного под углом 56° к направлению распространения излучения до оптимизации (пунктирные линии) и после (сплошные линии)

В качестве поляризаторов лазерного излучения могут быть также использованы покрытия, состоящие из четвертьволновых по ходу луча слоев, ориентированные под углом $70\text{--}80^\circ$ к направлению распространения излучения. В этом случае показатели преломления удастся выбрать таким образом, что покрытие имеет нулевое отражение p -поляризованной компоненты излучения, а коэффициент отражения s -поляризованной компоненты излучения составляет $85\text{--}95\%$. Поэтому для получения удовлетворительной степени поляризации требуется по крайней мере две поверхности с таким покрытием. На рис. 15 показаны спектральные зависимости коэффициента пропускания T_s и T_p , содержащего две поверхности с покрытиями при угле падения 70° . Характеристики такого поляризующего покрытия слабо чувствительны к изменению угла падения излучения.

Большой угол падения излучения на поверхность с покрытием не является ограничением для практического применения поляризатора; в ряде случаев это создает дополнительные преимущества, поскольку поверхность, содержащая покрытие, оказывается разгруженной по плотности мощности лазерного излучения (площадь светового пятна увеличивается обратно пропорционально косинусу угла падения излучения на покрытие).

В табл. 2 приведены основные параметры некоторых поляризующих покрытий, работающих при различных углах падения излучения.

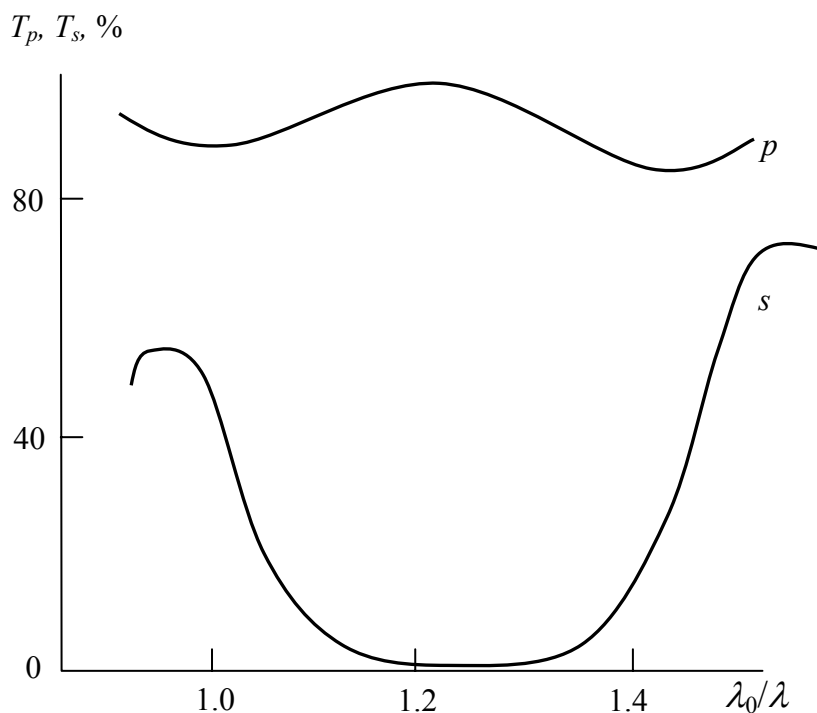


Рис. 15. Спектральные характеристики поляризатора, работающего при угле падения излучения, равном 70° , полученные в результате моделирования

Таблица 2

Основные параметры некоторых поляризующих покрытий

Материалы слоев	Число слоев	Угол, град.	T_p , %	T_s , %	Стойкость, ГВт/см ²
SiO_x ($x = 1.8-1.5$) – MgF_2	7	70	98	2.5	0.85
ZrO_2 (Al_2O_3) – SiO_2	9	70	97.5	2.5	1.50
Y_2O_3 – MgF_2	7	75	98	1	1.50
ZnS – SrF_2	4	80	98	1	2.00

В зависимости от конструкции прибора, для которого предназначен поляризатор, он может быть выполнен либо в виде плоскопараллельной пластины, на обе стороны которой нанесены покрытия, либо в виде двух призм, соединенных через воздушный промежуток, с поляризующими покрытиями, нанесенными на внутренние грани.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В зависимости от типа и конструкции интерференционного покрытия и рабочего волнового диапазона выбираются слои различных материалов. Поскольку покрытия создаются методами напыления, то важно, чтобы качество оптических пленочных материалов удовлетворяло ряду важных критериев:

- 1) прозрачность;
- 2) оптимальный показатель преломления;
- 3) оптическая однородность;
- 4) относительная плотность;
- 5) высокие адгезия и твердость, низкие механические напряжения;
- 6) подходящие к эксплуатации химические свойства (растворимость, реактивность);
- 7) стабильность поведения в условиях среды эксплуатации.

Указанным требованиям к пленочным материалам многослойных интерференционных покрытий удовлетворяют диэлектрические и полупроводниковые материалы. Среди диэлектриков чаще всего применимы оксиды, фториды, некоторые хлориды, сульфиды и селениды. Среди полупроводников – кремний, германий и теллур.

В табл. 3 приведены значения оптических постоянных наиболее распространенных диэлектрических и полупроводниковых пленочных материалов, полученных различными методами. Таблица составлена по данным отечественных и зарубежных работ [2]. Следует отметить, что оптические постоянные существенно зависят как от способа получения пленок, так и от технологических режимов. Следовательно, их следует рассматривать как ориентировочные. Подобные данные по представленным и некоторым другим материалам с технологическими тонкостями их получения можно найти в [8, 10] и других справочных изданиях.

Для изготовления интерференционных оптических покрытий наибольшее применение получили методы нанесения пленок в вакууме [2]. В настоящее время наряду с традиционными методами испарения в вакууме используются современные методы ионно-плазменного распыления. Последние удобны более широкими возможностями получения композиционных материалов и смесей (например - диэлектриков с разными показателями преломления), распыление которых позволяет получать слои с заданными оптическими постоянными в промежуточном диапазоне (между относительно низкопреломляющим и высокопреломляющим диэлектриком).

Возможность получения пленок сложного состава имеет место и в методах испарения, но она более дорогая и связана с проблемой совместного испарения материалов, имеющих разные температуры испарения. Тем не менее, резистивные и электроннолучевые методы испарения наиболее хорошо отработаны для изготовления интерференционных покрытий.

Таблица 3

Параметры и методы получения пленочных материалов оптических покрытий

Пленочный материал	Способ получения	Область прозрачности, мкм	Показатель преломления n в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 , мкм		Показатель поглощения k на длине волны λ , мкм	
			n	$\lambda_1 - \lambda_2$	k	λ
1	2	3	4	5	6	7
Na ₃ AlF ₆	ТИ, ЭЛИ	0.20 - 14	1.37 - 1.32	0.20 - 2	—	—
MgF ₂	ТИ, ЭЛИ	0.11 - 10	1.40 - 1.32	0.25 - 2	6.0·10 ⁻⁶ 9.0·10 ⁻⁵	1.06 0.52
ThF ₄	ТИ	0.20 - 15	0.57 - 1.5	0.25 - 2	2.0·10 ⁻⁶ 5.0·10 ⁻⁶	1.06 0.52
CeF ₃	ТИ	0.30 - 5	1.69 - 1.59	0.25 - 2	—	—
LaF ₃	ТИ, ЭЛИ	0.22 - 2	1.65 - 1.57	0.25 - 2	1.0·10 ⁻³	0.25
NaF ₃	ТИ, ЭЛИ	0.22 - 2	1.68 - 1.58	0.25 - 2	—	—
PbF ₂	ТИ	0.24 - 20	1.75 - 1.7	0.55 - 1	—	—
SiO ₂	ЭЛИ, КР, ВР, МР, ОР	0.20 - 8	1.46 - 1.44	0.40 - 1.6	2.0·10 ⁻⁶ 1.5·10 ⁻⁵	1.06 0.52
Al ₂ O ₃	ЭЛИ, КР, МР, ВР	0.20 - 11	1.65 - 1.57	0.50 - 1.6	8.0·10 ⁻⁶ 2.3·10 ⁻⁵	1.06 0.52
U ₂ O ₃	ЭЛИ, ТИ	—	1.95 - 1.77	0.25 - 2	4.0·10 ⁻³	0.25
HfO ₂	ЭЛИ, КР	0.25 - 9	2.31 - 1.97	0.25 - 2	1.6·10 ⁻³	0.25
ZrO ₂	ЭЛИ, КР	0.25 - 9	2.32 - 1.98	0.25 - 2	1.0·10 ⁻²	0.25
CeO ₂	ТИ, ЭЛИ	0.46 - 2	2.52 - 1.92	0.40 - 2	—	—
Ta ₂ O ₅	ЭЛИ, КР, МР, ВР, ОР	0.30 - 2	2.50 - 2.06	0.25 - 2	8.0·10 ⁻³	0.3
TiO ₂	ТРИ, ЭЛИ, КР, МР, ОР	0.40 - 3	2.55 - 2.1	0.40 - 1.5	2.5·10 ⁻⁴ 7.5·10 ⁻¹	1.06 0.52
ZnS	ТИ, ЭЛИ	0.38 - 25	2.35 - 2.2	0.40 - 5	3.0·10 ⁻⁶ 2.7·10 ⁻⁴	1.06 0.52

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
ZnSe	ТИ	0.60 - 15	2.60 - 2.3	0.50 - 2	—	—
Si	ТИ, ЭЛИ	1.10 - 9	3.4	3	—	—
Ge	ТИ, ЭЛИ	1.70 - 23	4.4	2	—	—
PbTe	ТИ, ЭЛИ	3.50 - 20	5.6	1 - 8	—	—
CdTe	ТИ, ЭЛИ	0.96 - 28	2.7	1 - 8	—	—
MoO ₂	МР	0.50 - >1	2.01 - 2.04	0.5 - 0.9	1.5·10 ⁻³ 2.0·10 ⁻⁴	0.5 0.7
WO ₃	МР, ОР	0.40 - >1	2.2	0.5 - 0.9	5.0·10 ⁻⁴	0.6
Sc ₂ O ₃	ЭЛИ	0.20 - 10	1.96 - 1.99	0.4 - 1	—	—
Y ₂ O ₃	ЭЛИ	0.20 - 10	1.75	0.4 - 1	—	—
Eu ₂ O ₃	ЭЛИ	0.26 - >1	1.82	0.4 - 1	—	—
La ₂ O ₃	ЭЛИ	0.20 - 10	2.03	0.4 - 1	—	—
Gd ₂ O ₃	ЭЛИ	0.22 - >1	1.98	0.4 - 1	—	—
Tb ₂ O ₃	ЭЛИ	—	1.96	0.4 - 1	—	—
Dy ₂ O ₃	ЭЛИ	0.21 - 10	1.97	0.4 - 1	—	—
Ln ₂ O ₃	ЭЛИ	0.22 - 10	1.93	0.4 - 1	—	—
Er ₂ O ₃	ЭЛИ	0.26 - >1	1.96	0.4 - 1	—	—
Sm ₂ O ₃	ЭЛИ	0.23 - >1	2.09	0.4 - 1	—	—
Ho ₂ O ₃	ЭЛИ	0.22 - >1	1.96	0.4 - 1	—	—
Yb ₂ O ₃	ЭЛИ	—	1.95	0.4 - 1	—	—
Pr ₆ O ₁₁	ЭЛИ	—	1.94	0.4 - 1	—	—

О б о з н а ч е н и я. ТИ - термическое испарение; ТРИ - термическое реактивное испарение; ЭЛИ - электронно-лучевое испарение; КР - катодное распыление; ВР - высокочастотное распыление; МР - магнетронное распыление; ОР - осаждение из растворов.

Для получения покрытия указанными методами вакуумная установка должна иметь, по крайней мере, две важные особенности. Первая – высокая однородность пленки по толщине, вторая – наличие системы контроля оптической толщины пленки [11].

В данном лабораторном практикуме получение интерференционных многослойных покрытий осуществляется с помощью установки вакуумного напыления ВУ-1А, внешний вид которой представлен на рис. 16.



Рис. 16. Установка вакуумного напыления ВУ-1А

В штатной комплектации вакуумная установка ВУ-1А оснащена комплексом фотометрического контроля толщины СФКТ-751В (производства ЛОМО, г. С.-Петербург). При выполнении данной лабораторной работы в качестве системы контроля толщины используется монитор оптических покрытий производства Беларусско-японского СП «Солар ТИИ», г. Минск [12].

Принцип измерения толщины основан на фотоэлектрическом методе регистрации лучистого потока, пропущенного через напыляемый образец или отраженного от него. При этом об оптической толщине напыляемого материала можно судить по изменению коэффициента пропускания или отражения образца. Экстремальным значениям коэффициента пропускания T (или отражения R) соответствует оптическая толщина nd (где d - геометрическая толщина) пленки, кратная значениям:

$$nd = \frac{\lambda}{4} \cdot m; \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

где λ - длина волны излучения; m - число слоев.

Оптическая схема комплекса СФКТ-751В для контроля оптической толщины пленки по изменению ее пропускания приведена на рис. 7, а. В схему входят верхний и нижний блоки пропускания, элементы вакуумной установки, монохроматор с приемником излучения.

Световой поток от лампы накаливания 1 блока источника излучения падает на сферическое зеркало 2, затем – на плоское зеркало 3, направляющее изображение нити лампы на плоскость напыляемого образца 5 (контрольного или “свидетеля”), расположенного внутри вакуумной камеры. Излучение попадает в камеру через входное окно 4, проходит образец и через выходное окно 6 камеры попадает на линзу 7 нижнего блока пропускания. Далее луч направляется плоским зеркалом 8 через защитное стекло 9 на линзу 10, формирующую изображение нити лампы на входной щели 12 монохроматора.

Пройдя входную щель монохроматора, излучение попадает на внеосевое параболическое зеркало 13 и отклоняется им на плоскую дифракционную решетку 14. Дифрагированное излучение от решетки попадает снова на зеркало 13 и фокусируется плоским зеркалом 15 на выходную щель 16 монохроматора. После выходной щели излучение попадает непосредственно на катод фотоэлектрического умножителя. Устранение мешающего излучения достигается с помощью отрезающих фильтров 11, которые помещаются перед входной щелью 12.

Для обеспечения высокой энергетической эффективности излучения во всем диапазоне работы комплекса (250 – 1100 нм) предусмотрены две сменные дифракционные решетки с 1200 и 600 штрих/мм и максимумами излучения на $\lambda = 300$ и 650 нм.

Данные о величине обратной линейной дисперсии монохроматора с обеими решетками представлены в табл. 4.

Таблица 4

Обратная линейная дисперсия монохроматора СФКТ-751В

λ , нм	Решетка, штр./мм	Обратная линейная дисперсия, нм/мм
250	1200	3.0
350		2.9
450		2.9
500		2.9
450	600	5.9
550		5.9
650		5.9
850		5.8
950		5.7
1000		5.7
1100		5.7

Данные о фильтрах, решетках и фотоприемниках монохроматора комплекса СФКТ-751В приведены в табл. 5.

Входная и выходная щели монохроматора служат для изменения сигнала, в итоге поступающего на фотоприемник. Однако следует помнить, что при увеличении щели увеличивается спектральный интервал, который можно оценить по формуле:

$$\Delta\lambda = S \frac{d\lambda}{dl},$$

где S - ширина раскрытия щели, мм;

$d\lambda/dl$ - обратная линейная дисперсия (см. табл. 4).

Эффективная ширина щели и напряжение питания на фотоприемнике и лампе следует подбирать, учитывая конкретные требования работы.

Таблица 5

Параметры элементов комплекса СФКТ-751В

λ , нм	Решетка штр./мм	Отрезающие фильтры	Фотоприемник
250 - 500	1200	УФС1 (250 - 380 нм) БС4 (360 - 500 нм)	ФЭУ-39А ФЭУ-100 (от 350 - 500 нм)
450 - 1100	600	ЖС16 (480 - 920 нм) КС15 (670 - 1200 нм)	ФЭУ-100 (до 800 нм) ФЭУ-62 (600 - 1100 нм)

На рис. 16, б приведена *оптическая схема комплекса на отражение*. Студентам предлагается разобрать ее самостоятельно.

Оптическая схема монитора оптических покрытий СП «Солар ТИИ» приведена на рис. 17. Монитор выполнен на основе двух спектрографов S-150, соответственно, на ультрафиолетовый – видимый диапазон (250-1050 нм) и ближний инфракрасный диапазон (900-1600 нм). Система предусматривает возможность измерения по схемам отражения и пропускания. В качестве фотоприемников используются ПЗС-матрицы фирмы Hamamatsu.

Параметры устройства регистрации спектров отражения и пропускания в УФ–видимом диапазоне длин волн следующие:

- количество одновременно регистрируемых каналов – 4;
- спектральный диапазон 250-1050 нм;
- спектральный прибор – спектрограф с дифракционной решеткой с компенсацией астигматизма;
- детектор – матричный ПЗС модели S7010-1006UV фирмы Hamamatsu;
- рассеянный свет < 0.5 %;
- абсолютная погрешность калибровки по длинам волн < 1 нм;
- фотометрическая точность +/-1.5 %;
- дрейф нуля +/- 0.002 А за 1 час работы.

Параметры устройства регистрации спектров отражения и пропускания в ИК-диапазоне длин волн следующие:

- количество одновременно регистрируемых каналов – 1;
- спектральный диапазон 900 – 1600 нм;
- спектральный прибор – спектрограф с дифракционной решеткой с компенсацией астигматизма;
- детектор – InGaAs линейный детектор модели G9201-256S фирмы Hamamatsu;
- рассеянный свет < 0.5 %;
- абсолютная погрешность калибровки по длинам волн < 3 нм;
- фотометрическая точность +/-1.5 %;
- дрейф нуля +/- 0.002 А за 1 час работы.

Для обеих спектрографических частей монитора оптических покрытий в качестве источника излучения используется импульсная ксеноновая лампа с последующей синхронизацией при измерении на переменном сигнале (детектирование). В обоих случаях диапазон измерения коэффициентов отражения и пропускания составляет 1-100 %. Среднее значение обратной линейной дисперсии для видимого спектрографа – 30 нм/мм, для инфракрасного – 55 нм/мм. Время установления рабочего режима с момента включения – не более 15 мин.

Процесс изготовления интерференционного оптического покрытия подразумевает выполнение набора последовательных операций, которые определяются маршрутной картой и технологическими условиями приготовления конкретного прибора, определенного покрытия.

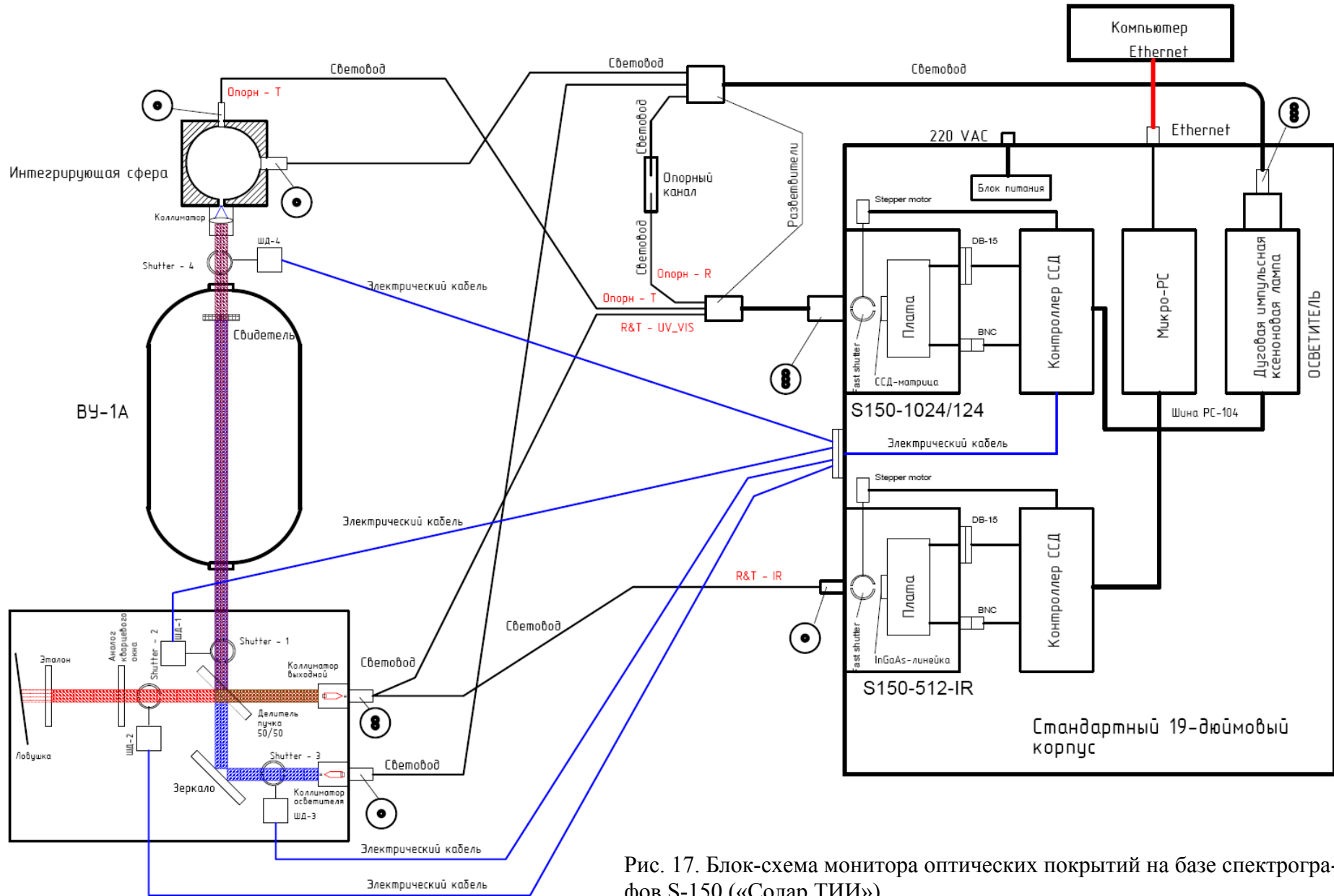


Рис. 17. Блок-схема монитора оптических покрытий на базе спектрографов S-150 («Солар ТИИ»)

ЗАДАНИЕ

1. Изучить принцип действия, устройство и порядок работы с системой вакуумной откачки установки ВУ-1А.
2. Изучить устройство и порядок работы с испарителями установки ВУ-1А.
3. Изучить устройство и порядок работы с системой фотометрического контроля СФКТ-751В.
4. Изучить устройство и порядок работы с монитором оптических покрытий на базе спектрографов S-150 («Солар ТИИ»).
5. Спроектировать многослойные интерференционные покрытия. Требования к покрытию задаются преподавателем.
6. Составить технологические условия и порядок изготовления заданных интерференционных покрытий.
7. Изготовить необходимые покрытия. Измерить их оптические характеристики с помощью монитора оптических покрытий и спектрофотометров МДР-204 («ЛОМО Фотоника»), Cary 5000.
8. Сравнить полученные результаты с расчетными. Дать выводы и рекомендации по совершенствованию процесса изготовления заданных покрытий.

ВОПРОСЫ

1. Роль интерференционных покрытий в элементах оптики и оптоэлектроники.
2. Классификация и физические принципы работы интерференционных оптических покрытий.
3. Принципы расчета интерференционных оптических покрытий. Синтез и анализ.
4. Необходимые технологические условия для изготовления интерференционных оптических покрытий.
5. Фотометрический контроль оптической толщины пленок в технологии интерференционных покрытий.
6. Материалы интерференционных покрытий. Требования и технология.
7. Оптические постоянные пленкообразующих материалов. Дисперсии $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$. Способы их контроля.
8. Параметры, характеризующие интерференционные покрытия, и их измерение.
9. Эксплуатационные требования к интерференционным покрытиям как элементам оптоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев А.Н. Оптика. – М.: Высшая школа, 1985. – 351 с.
2. Яковлев П.П., Мешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий / Серия: Библиотека приборостроителя. – М.: Машиностроение, 1987 – 185 с.
3. Синтез просветляющих покрытий методом прямого поиска / Г.Я. Колодный, Е.А. Левчук, Б.Б. Мешков, П.П. Яковлев // Квантовая электроника. – 1978. – Т. 5, N 1. – С. 83–88.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
5. Москалев В.А. Теоретические основы оптико-физических исследований. – Л.: Машиностроение, 1987. – 318 с.
6. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. – М.: Радио и связь, 1989. – 359 с.
7. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
8. Риттер Э. Пленочные диэлектрические материалы для оптических применений / В кн.: Физика тонких пленок // Под ред. Г. Хасса, М. Франкомбра, Р. Гофмана. – т. 8. – М.: Мир, 1978. – С. 7–60.
9. Многослойные интерференционные покрытия в квантовой электронике / Г.Я. Колодный, Е.А. Левчук, Ю.Д. Порядин, П.П. Яковлев // Электронная промышленность. – 1981. – N 5, 6. – С. 93–101.
10. Технология тонких пленок. Справочник / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. – т. 1. – М.: Сов. радио, 1977. – 662 с.
11. Глудкин О.П., Густов А.Е. Устройства и методы фотометрического контроля в технологии производства ИС. – М.: Радио и связь, 1981. – 112 с.
12. Сайт СП «СОЛАР ТИИ»: www.solartii.com

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ

(Лабораторный практикум для магистров)

Составители:

Ершов Алексей Валентинович

Машин Александр Иванович

Компьютерный набор, рисунки и верстка **И.А. Карабановой**

Подписано к печати _____ Формат 60×84 1/16

Печать офсетная. Бумага оберточная. Усл. печ. л. 2.3

Тираж 150 экз. Заказ _____ .

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950, ГСП-20, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23

Типография ННГУ, 603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37
