

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики полупроводников и оптоэлектроники

**ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА
В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ**

(лабораторная работа по курсу «Физико-химические основы технологии»)

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

Интерференционные многослойные зеркала в оптоэлектронике: Лабораторная работа по курсу «Физико-химические основы технологии» / Сост. А.В. Ершов, И.А. Карабанова. – Н. Новгород: ННГУ, 2007. – 26 с.

Настоящее описание предназначено для студентов старших курсов физического факультета ННГУ, обучающихся по специальности 210601 – «Нанотехнология в электронике».

Рис. 8. Табл. 6.

Составители: канд. физ.-мат. наук, доцент А.В. Ершов
 ведущий электроник И.А. Карабанова

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, доцент В.В. Карзанов

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

ВВЕДЕНИЕ

Явление интерференции света в многослойных периодических системах из прозрачных материалов с разными показателями преломления нашло ряд важных применений в современной оптоэлектронике. К ним следует отнести разработку пассивных элементов оптоэлектроники – в частности многослойных интерференционных покрытий – таких, как просветляющие покрытия, полосовые светофильтры, зеркала, поляризаторы и ослабители [1].

Основы проектирования просветляющих покрытий были развиты применительно к нуждам оптики: просветление объективов визуальной, фотографической и приборной оптики. Появление лазеров и соответствующей техники потребовало освоения разработки качественных интерференционных зеркал. Другие, из перечисленных выше, интерференционные покрытия были освоены при совершенствовании аппаратуры волоконно-оптических линий связи.

Целью данной лабораторной работы является теоретическое и практическое изучение основ разработки интерференционных многослойных зеркал и их получение методом электроннолучевого испарения в вакууме.

Многослойные интерференционные зеркала обычно формируют на основе диэлектрических материалов с разными показателями преломления, из-за чего их часто еще называют диэлектрическими зеркалами. По сравнению с металлическими интерференционные зеркала имеют ряд преимуществ:

- 1) они обладают бóльшим коэффициентом отражения (вплоть до 99.9 %);
- 2) они позволяют достигнуть существенно меньших потерь света на поглощение в зеркале, что имеет решающее значение для повышения качества интерференционной аппаратуры;
- 3) применение интерференционных зеркал позволяет преодолеть ограничения, налагаемые природой металлического отражения, и намного расширить рабочий диапазон длин волн;
- 4) имеется возможность изготавливать коррозионноустойчивые интерференционные зеркала с любым заданным коэффициентом отражения;
- 5) интерференционные зеркала могут быть изготовлены таким образом, что, обладая высоким коэффициентом отражения в одной области спектра, они оказываются почти прозрачными для других длин волн, что открывает целый ряд новых возможностей при конструировании оптической аппаратуры.

Действие многослойных диэлектрических зеркал основано на многолучевой интерференции, которая может возникать при многократных отражениях светового пучка внутри плоскопараллельной пластины или при отражениях от границ раздела в многослойных структурах.

МНОГОЛУЧЕВАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ В ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЯХ

Основные сведения

При наложении двух когерентных световых пучков образуются интерференционные полосы, в которых распределение интенсивности описывается функцией $I \sim \cos^2(k\Delta/2)$ (k – волновое число, Δ – разность хода пучков). Максимумы и минимумы интенсивности, т. е. светлые и темные полосы, в двухлучевой интерференционной картине имеют одинаковую ширину. При наложении большого числа пучков распределение интенсивности в интерференционной картине существенно иное. Изменение характера интерференционных полос при увеличении числа N пучков качественно можно предсказать на основе закона сохранения энергии. Амплитуда световых колебаний в максимумах интенсивности, где сложение колебаний происходит в одинаковой фазе, в N раз больше, а интенсивность в N^2 раз больше, чем от одного пучка (при условии, что когерентные пучки имеют одинаковую или почти одинаковую интенсивность). Но полная энергия, приходящаяся на одну интерференционную полосу, лишь в N раз больше, чем в одном пучке. Увеличение интенсивности в максимумах в N^2 раз возможно только в случае существенного перераспределения потока энергии в пространстве: при прежнем расстоянии между светлыми полосами их ширина должна быть примерно в N раз меньше этого расстояния. Благодаря образованию узких максимумов, т.е. резких светлых полос, разделенных широкими темными промежутками, многолучевая интерференция получила важное практическое применение в просветлении оптики, оптических фильтрах и многослойных диэлектрических покрытиях. В частности, на интерференции при многократных отражениях света от двух параллельных поверхностей (метод деления амплитуды) основан принцип действия интерферометра Фабри-Перо, широко используемого в спектроскопии высокого разрешения и в метрологии [2].

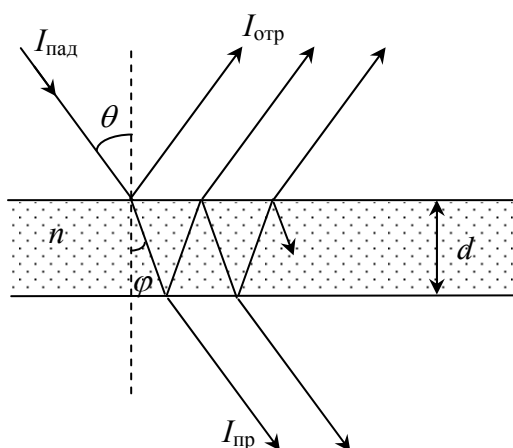


Рис. 1. Многолучевая интерференция при прохождении световой волны через плоскопараллельный диэлектрический слой.

Рассмотрим многолучевую интерференцию, возникающую при прохождении световой волны через плоскопараллельный диэлектрический слой толщиной d и показателем преломления n (рис. 1). θ и φ – углы падения и преломления на верхней границе ($\sin \theta = n \sin \varphi$). Разность хода лучей будет

$$\Delta = 2nd \cos \varphi.$$

Следует учесть, что при отражении волны от верхней границы слоя в соответствии с формулами Френеля ее фаза изменяется на π . Поэтому разность фаз δ складываемых волн равна

$$\delta = (4\pi/\lambda_0) \cdot nd \cos \varphi \pm \pi = k\Delta \pm \pi,$$

где λ_0 – длина волны в вакууме, $k = 2\pi/\lambda_0$.

В многолучевой интерференции света интенсивность прошедшей и отраженной волн описывается с помощью формул Эйри [3]:
для прошедшей волны

$$I_{пр} = I_{пад} \frac{(1-R)^2}{1+R^2-2R\cos\delta} = I_{пад} \frac{1}{1+\left(4R/(1-R)^2\right)\sin^2(\delta/2)},$$

для отраженной волны

$$I_{отр} = I_{пад} \frac{2R(1-\cos\delta)}{1+R^2-2R\cos\delta} = I_{пад} \frac{\left(4R/(1-R)^2\right)\sin^2(\delta/2)}{1+\left(4R/(1-R)^2\right)\sin^2(\delta/2)}.$$

Для простоты будем считать, что угол падения θ мал и компоненты поляризации имеют один и тот же коэффициент отражения R от границ слоя. Будем также считать, что поглощение в слое очень мало (т. е. выполняется условие $I_{пр} + I_{отр} = I_{пад}$), а отражение от границ достаточно велико, и, следовательно, для анализа интерференции необходимо учитывать лучи, многократно отразившиеся внутри слоя.

Для определения интенсивности света, прошедшего через слой, необходимо рассмотреть бесконечную последовательность убывающих по амплитуде лучей. Применяя к этой последовательности формулу для суммы геометрической прогрессии, можно получить следующее соотношение для коэффициента пропускания слоя:

$$T = \frac{I_{пр}}{I_{пад}} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(\delta/2)}. \quad (1)$$

Данное соотношение также носит название формулы Эйри.

Коэффициент пропускания $T = 1$ при условии $\delta/2 = m\pi$ (m – целое число).

На рис. 2 приведен график зависимости функции Эйри T (прозрачности слоя) от разности фаз δ для различных коэффициентов отражения границ R .

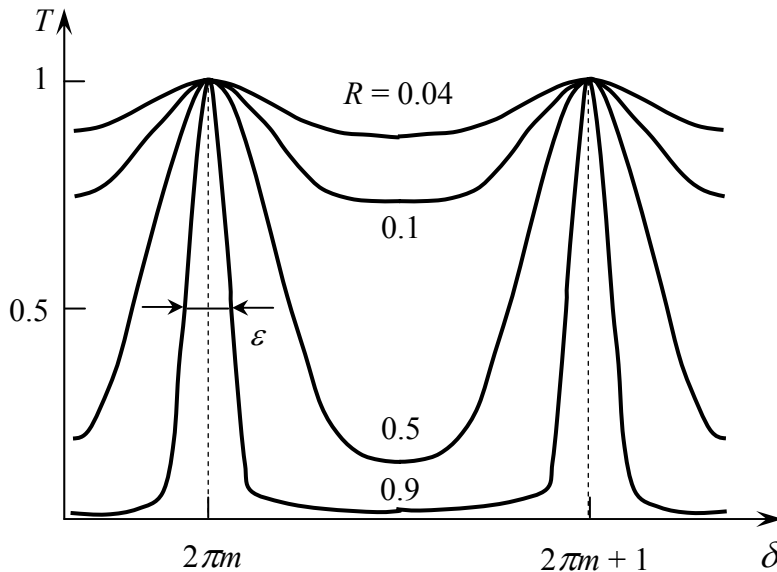


Рис. 2. Зависимость прозрачности слоя от разности фаз для различных коэффициентов отражения.

С увеличением коэффициента отражения R максимумы кривых интенсивности прошедшего света сужаются, а в промежутках между ними интенсивность становится очень мала, то есть картинка становится *контрастной*. Контрастность интерференционных полос характеризуется отношением интенсивности в максимумах и минимумах, которое определяется только коэффициентом отражения:

$$\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{(1 + R)^2}{(1 - R)^2}.$$

Многочуевая интерференционная картина в прошедшем свете при значениях $R \rightarrow 1$ имеет вид узких светлых полос на почти совершенно темном фоне. В отраженном свете наблюдается дополнительная картина в виде узких темных полос на почти равномерном светлом фоне. Подобное пространственное перераспределение потока энергии с концентрацией его в некоторых преимущественных направлениях всегда возникает при интерференции многих пучков.

Острота интерференционных максимумов характеризуется шириной зависимости интенсивности от разности фаз на полувысоте (полушириной ε), т. е. расстоянием между точками, лежащими по обе стороны максимума в тех местах, где интенсивность уменьшается до половины максимального значения (как это обозначено на рис. 2). Около максимума порядка m эти точки находятся при $\delta = 2\pi m \pm \varepsilon/2$.

При большом коэффициенте отражения R величина $\varepsilon \ll 1$. Тогда для изменения разности фаз δ , соответствующего полуширине интерференционного пика, пользуясь формулой Эйри (1) для прошедшей волны, получим

$$\varepsilon = \frac{2(1 - R)}{\sqrt{R}}.$$

Многослойные диэлектрические зеркала

Рассмотрим идею получения диэлектрического зеркала. Пусть на поверхность стекла (или кварца), показатель преломления которого n_s , нанесен прозрачный (поглощения нет) диэлектрический слой с показателем преломления $n > n_s$. Толщина слоя d выбрана так, чтобы его оптическая толщина nd была равна $\lambda_0/4$, т. е. четверти длины волны в вакууме. Здесь λ_0 – некоторая выбранная (заданная) длина волны. При этом увеличивается коэффициент отражения поверхности. Действительно, волны, отраженные (при нормальном падении) передней и задней границами слоя, находятся в фазе, так как отставание фазы второй волны на π , накопившееся при ее распространении внутри пленки туда и обратно, компенсируется изменением фазы первой волны на π при ее отражении от оптически более плотной среды. Иными словами, на передней грани происходит скачок фазы волны на π и такое же изменение фазы дает оптическая разность хода лучей.

Пусть свет падает из воздуха (среда 1 на рис. 3) по нормали на поверхность стекла (среда 3) с нанесенной на стекло тонкой пленкой (среда 2). Путем сложения амплитуды отраженной от наружной поверхности пленки волны с амплитудами волн, выходящих из пленки в воздух после многократных отражений в ней, получаем формулу для суммарного амплитудного коэффициента отражения R_I :

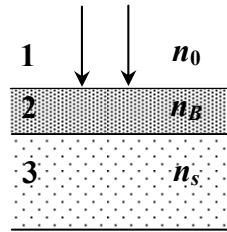


Рис. 3. Падение света по нормали из воздуха (1) на стеклянную подложку (3) с нанесенной тонкой прозрачной пленкой (2).

$$R_I = R_{12} + \frac{R_{23}(1 - R_{12}^2) \exp[-i(2\beta + \gamma)]}{1 + R_{23}R_{12} \exp[-i(2\beta + \gamma)]}.$$

Здесь R_{12} и R_{23} – амплитудные коэффициенты отражения на границах сред:

$$R_{12} = \frac{n_0 - n_B}{n_0 + n_B}, \quad R_{23} = \frac{n_B - n_s}{n_B + n_s},$$

$\beta = (2\pi/\lambda)n_B d$, γ – фазовый сдвиг, учитывающий скачки фазы на границе.

На рис. 4 показано, как изменяется коэффициент отражения по мощности $R = |R_I|^2$ системы «воздух ($n_0 = 1$) – пленка (n_B) – стекло (n_s)» для излучения с длиной волны λ в зависимости от оптической толщины пленки $n_B \cdot d$.

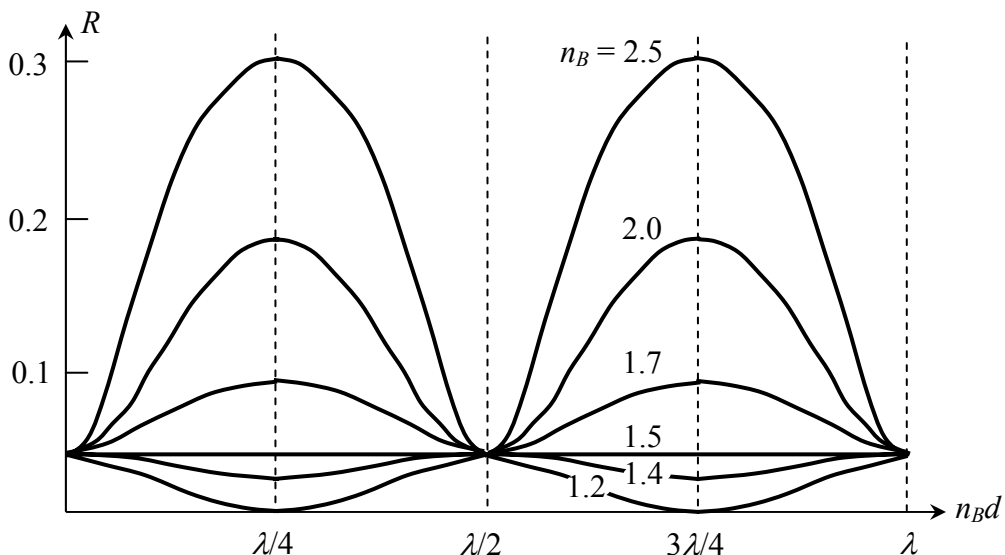


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения системы от оптической толщины пленки для различных значений показателя преломления вещества пленки и заданной длины волны λ .

Если пленка является четвертьволновой ($n_B d = m\lambda/4$, $m=1, 3, 5\dots$), для R получается выражение

$$R = \left(\frac{n_0 n_s - n_B^2}{n_0 n_s + n_B^2} \right)^2.$$

Максимальное значение коэффициента отражения системы тем выше, чем выше показатель преломления пленки n_B . Отсюда и следует возможность увеличения отражения от поверхности путем нанесения на нее четвертьволнового слоя.

Если величина n_B близка к n_s ($n_B \cong 1.5$), то границы раздела нет и невозможно отличить пленку от стеклянной подложки. Коэффициент отражения системы $R = 0.04$ (рис. 4) есть коэффициент отражения от границы «воздух – стекло» и не зависит от толщины пленки. Такая же величина R достигается для $n_B d = m\lambda/2$ ($m = 0, 1, 2\dots$) для любых значений n_B .

На практике высокого коэффициента отражения добиваются путем применения многослойных покрытий с чередующимся высоким (n_B) и низким (n_H) показателем преломления. Если оптическая толщина всех слоев одинакова и равна $\lambda_0/4$, то отраженные их границами волны находятся в одинаковой фазе и в результате интерференции усиливают друг друга.

Такие многослойные диэлектрические покрытия дают высокую отражательную способность только в ограниченной области длин волн вблизи значения λ_0 , для которого оптическая толщина слоев равна $\lambda_0/4$.

Итак, амплитудные коэффициенты отражения многослойного зеркала подсчитываются путем сложения амплитуд отраженных от каждого слоя лучей с учетом многократных отражений внутри слоев и фазовых сдвигов при отражениях.

При точном равенстве оптической толщины слоев $\lambda_0/4$ коэффициент отражения многослойного зеркала при падении света по нормали из воздуха подсчитывается по следующим простым формулам для четного ($2N$) и нечетного ($2N+1$) числа слоев, соответственно:

$$R_{2N} = \left(\frac{1 - n_s (n_1 / n_2)^{2N}}{1 + n_s (n_1 / n_2)^{2N}} \right)^2,$$

$$R_{2N+1} = \left(\frac{1 - n_1 (n_1 / n_s) (n_1 / n_2)^{2N}}{1 + n_1 (n_1 / n_s) (n_1 / n_2)^{2N}} \right)^2.$$

Эти формулы справедливы при условии, что показатель преломления воздуха $n_0 = 1$.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛ

В большинстве случаев для изготовления интерференционных зеркал наиболее целесообразно использовать покрытия из чередующихся слоев с высокими и низкими показателями преломления, имеющих одинаковую оптическую толщину, кратную $\lambda_0/4$. Чередование слоев соответствует тому обстоятельству, что для каждого из слоев при этом выполняется условие антипросветления (обе обрамляющие среды имеют либо большие, либо меньшие показатели преломления).

Если зеркало работает в воздухе, то наружный слой, очевидно, должен иметь высокий коэффициент преломления, ибо в противном случае он будет оказывать просветляющее действие, то есть ухудшать действие зеркального покрытия как целого. Если же зеркало граничит снаружи с веществом, обладающим большим показателем преломления, то условие просветления обращается и наружный слой должен изготавливаться из материала с низким показателем преломления. Эти требования относятся и к нижнему слою покрытия. Однако если величина показателя преломления подложки лежит между значениями показателей преломления веществ, из которых изготавливаются слои, то выбор нижнего слоя произволен. При соблюдении этих условий коэффициент отражения монотонно растет с увеличением числа слоев. Однако четные слои оказывают меньшее влияние на отражательную способность покрытия, чем нечетные. Это иллюстрируется, например, табл. 1, показывающей зависимость коэффициента отражения R от числа слоев N для покрытий типа «воздух – ZnS – MgF₂ – ZnS – ... – стекло».

Таблица 1

Зависимость коэффициента отражения R от числа слоев зеркала типа
«воздух – ZnS – MgF₂ – ZnS – ... – стекло»

Число слоев N	1	2	3	4	5	6
R	0.31	0.39	0.675	0.725	0.87	0.95

Как видно из таблицы, наиболее целесообразным оказывается использование покрытий из нечетного числа слоев.

На рис. 5 приведены кривые коэффициента отражения зеркал с различным числом слоев ZnS и криолита [4]. Из рисунка видно, что с ростом числа слоев область высокого отражения сужается, пик R становится более плоским и приобретает вид плато, а величина отражения возрастает. Ширина плато $\Delta\lambda$, т. е. ширина области высокого отражения, зависит от разности показателей преломления слоев. Чем она больше, тем шире область отражения.

Вещества, используемые в интерференционных зеркалах, должны образовывать прочные, стойкие к атмосферным воздействиям покрытия и обладать малым поглощением в рабочей области длин волн.

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 областями высокого отражения. Недостатком такого метода является необходимость нанесения большого числа слоев.

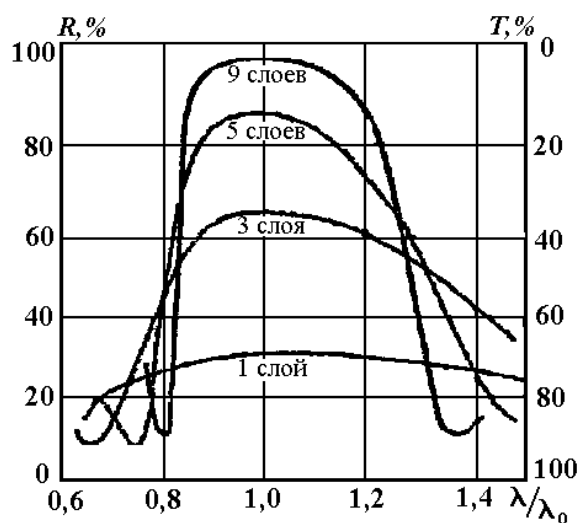


Рис. 5. Коэффициенты отражения (R) и пропускания (T) зеркал с разным числом слоев.

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 [5]. Некоторого увеличения области высокого отражения можно достичь, увеличивая разницу в показателях преломления слоев, составляющих покрытие, но этот метод ограничен выбором материалов с необходимыми параметрами. Имеются работы [6], в которых решается проблема расчета и изготовления зеркал для лазеров, имеющих две области высокого отражения. В этом случае к ним, кроме высокого отражения, предъявляются такие требования, как низкие потери (т. е. потери на поглощение и рассеяние света) для лазеров малой мощности, высокая лучевая прочность для мощных лазеров, а также ряд других требований, которые, в конечном счете, определяют КПД и долговечность работы лазеров. Эти задачи решаются в каждом конкретном случае выбором материалов слоев и оптимальной технологии их нанесения.

Рассмотрим диэлектрические материалы, используемые в интерференционной оптике, и их свойства. Разделим все материалы на отдельные группы в соответствии с их химическим составом [7].

Галогениды

Галогениды и, в частности, фториды принадлежат к классу материалов, которые легко испаряются и конденсируются, сохраняя стехиометрию.

Исключительно важное значение среди фторидов имеют криолит (Na_3AlF_6 — соединение NaF и AlF_3), MgF_2 и ThF_4 . Криолит испаряют из тиглей, изготовленных из тугоплавких металлов. Масс-спектрометрический анализ показывает, что криолит диссоциирует при нагревании. При более низких температурах испарителя в газовой фазе преобладает NaF , а при более высоких — AlF_3 . Поэтому состав получаемых пленок зависит от температуры резистивного испарителя и скорости испарения. Пленки криолита прозрачны и имеют низкий коэффициент поглощения в области длин волн 0,2 — 14 мкм. Их показатель преломления зависит от условий испарения и состава полученной пленки ($n_{\text{NaF}} = 1.29 \div 1.31$, $n_{\text{AlF}_3} = 1.385$). Значения показателя преломления пленок криолита $n_{\text{Na}_3\text{AlF}_6} = 1.28 \div 1.36$. Средней величиной считает-

ся $n = 1.35$. Пленки поглощают пары воды в процессе и после испарения, что накладывает дополнительные требования к условиям эксплуатации покрытий.

Пленки AlF_3 наносятся сублимацией при 1100°C из молибденовых тиглей. Они прозрачны в области $0.195 \div 10$ мкм; показатель преломления в вакууме равен 1.23, на воздухе – 1.38. Такая большая разница объясняется малой плотностью пленки (0.64) по отношению к объемному кристаллу.

MgF_2 легко испаряется из танталовых или вольфрамовых лодочек, а также с помощью электронного луча. Пленки MgF_2 используются в диапазоне длин волн $0.115 \div 4$ мкм. Выше этого значения в четвертьволновой пленке появляются трещины из-за высоких внутренних механических напряжений. Кроме того, в пленках микронной толщины поглощение отсутствует только до длины волны $\lambda = 4$ мкм, выше которой ощутимое поглощение дают структурные дефекты пленки. В более тонких пленках верхняя граничная длина волны высокого пропускания может достигать 10 мкм. Показатель преломления пленок из фторида магния, из-за высокой пористости, в видимой области зависит от температуры подложки и количества поглощенной влаги. Увеличение температуры подложки увеличивает показатель преломления и усиливает зависимость от других технологических параметров – таких, как давление пара. Пленки MgF_2 всегда имеют поликристаллическую структуру, хотя в тонких пленках и пленках, осажденных на холодные подложки, величина зерна значительно меньше, чем в толстых пленках или пленках, осажденных на нагретые подложки. При толщинах более 100 нм пленки становятся оптически неоднородными. В пленках MgF_2 обнаружены очень высокие растягивающие напряжения ($3000\text{--}5000$ кГ/см² при толщине 100 нм). Механические и химические свойства пленок в основном зависят от плотности. Пленки с высокой плотностью, полученные при температуре подложки 300°C или путем отжига после осаждения, очень стабильны, тверды и обладают хорошей адгезией.

Пленки ThF_4 чаще используются в диэлектрических зеркалах, особенно в лазерной технике. Для испарения ThF_4 используются лодочки из тантала. Получаемые пленки прозрачны в диапазоне длин волн $0.2 \div 15$ мкм. Показатель преломления при $\lambda = 550$ нм равен 1.52. Пленки очень стабильны механически и химически устойчивы. Плотность пленок зависит от условий их приготовления. В пленках ThF_4 наблюдаются растягивающие напряжения $\sim 1100\text{--}1500$ кГ/см², которые при выдержке на воздухе заметно уменьшаются. Толстые пленки ThF_4 не растрескиваются и не отслаиваются, что делает их вполне пригодными для использования в инфракрасном диапазоне. ThF_4 – радиоактивен. Необходимо соблюдать все меры предосторожности, предусмотренные для работы с радиоактивными материалами в соответствии с имеющимися правилами.

Кроме рассмотренных материалов, в интерференционной оптике применяют и другие фториды – такие, как CeF_3 , LiF , BaF_2 , PbF_2 . Достоинства и недостатки описанных выше фторидов приведены в табл. 2.

Сульфиды и селениды

ZnS применяется в оптических покрытиях для видимой и ИК-областей спектра. Пленки ZnS часто используются в комбинации с пленками фторидов типа Na_3AlF_6 , MgF_2 , ThF_4 , обладающими низкими показателями преломления. Также ZnS очень хорошо совмещается с полупроводниковыми материалами (например с PbTe, Ge), так как образует толстые пленки, которые не растрескиваются и не отслаиваются при работе в ИК-диапазоне. Полоса пропускания таких покрытий перекрывает видимый и ИК-диапазон вплоть до 14 мкм. Показатель преломления в видимой области изменяется от 2.6 до 2.3, обнаруживая вблизи края поглощения сильную дисперсию. В ИК-области показатель преломления ~ 2.3 . В УФ-диапазоне пленки ZnS поглощают. Пленки обладают высокой относительной плотностью. Стабильность пленок ZnS сильно зависит от чистоты и способа предварительной обработки подложки. ZnS испаряется при температуре 1200 °C. При нагреве ZnS диссоциирует на Zn и S. При конденсации Zn и S снова ассоциируют в ZnS. Этим объясняется сильная зависимость коэффициента конденсации от температуры подложки даже в области 20–300 °C. ZnS испаряют из молибденовых и вольфрамовых лодочек.

ZnSe во многом аналогичен ZnS. Пленки ZnSe используют в производстве лазерных зеркал. Недостатком этих пленок является наличие поглощения в коротковолновой части видимого диапазона (до 0.46 мкм), а преимуществом – высокий показатель преломления (2.65 при $\lambda = 550$ нм).

Sb_2S_3 имеет высокий показатель преломления в красной части видимого диапазона. В более коротковолновой области он сильно поглощает. Показатель преломления $\text{Sb}_2\text{S}_3 \sim 2.35$ при $\lambda = 600$ нм.

Достоинства и недостатки этих материалов приведены в табл. 2.

Оксиды

Оксиды обладают высокой механической прочностью и химической стабильностью. Показатели преломления оксидов перекрывают широкий диапазон. Для покрытий с низким показателем преломления используют пленки SiO_2 и Si_2O_3 . Промежуточные значения показателей преломления имеют пленки SiO, Al_2O_3 , MgO, ThO_2 , ZrO_2 и редкоземельные окислы. CeO_2 и TiO_2 обладают высокими показателями преломления.

Пленки SiO_2 лучше всего получать электроннолучевым способом. При этом для получения плотных и стабильных пленок подложку необходимо нагревать до 150 °C. Пленки SiO_2 получают также реактивным испарением SiO в ионизированном кислороде. Пленки SiO_2 прозрачны в области $0.2 \div 9$ мкм, $n = 1.46$ при $\lambda = 550$ нм. Пленки, осажденные на горячие подложки, обладают высокой относительной плотностью, хорошей адгезией и очень высокой химической и механической стабильностью.

Пленки Si_2O_3 образуются при испарении монооксида кремния в атмосфере кислорода. Эти пленки имеют показатель преломления 1.55 и погло-

щают в УФ-области. Однако УФ-поглощение можно устранить УФ-облучением.

Пленки SiO образуются при испарении SiO без кислорода. Они поглощают в видимой области, но прозрачны в ИК-диапазоне вплоть до 8 мкм. Пленки SiO имеют показатель преломления ~ 2 в видимой области и ~ 1.8 в инфракрасной. Пленки обладают высокой химической и механической стабильностью и являются прекрасными покрытиями для ИК-диапазона.

Пленки Al₂O₃ получают только электроннолучевым испарением. При тщательном приготовлении пленки имеют полосу пропускания от 0.2 вплоть до 7 мкм. Пленки аморфны и обладают очень высокой твердостью и адгезией. Показатель преломления пленок Al₂O₃ ~ 1.6 в видимом диапазоне.

Пленки MgO можно получать испарением электронным лучом; полоса пропускания таких пленок лежит в области $0.22 \div 8$ мкм. Пленки имеют поликристаллическую структуру; размер кристаллитов увеличивается при повышении температуры подложки. При длительной выдержке на воздухе поверхность пленок MgO покрывается мутным голубоватым рассеивающим налетом. Поэтому пленки MgO нельзя использовать в оптических покрытиях в качестве внешнего слоя. Кроме того, пленки MgO не нашли широкого применения вследствие ограниченной стабильности.

ThO₂ испаряют электронным лучом. Пленки диоксида тория прозрачны в УФ-области и имеют показатель преломления, меняющийся от $n = 2.1$ при $\lambda = 0.2$ мкм до $n = 1.95$ при $\lambda = 0.3$ мкм. Пленки ThO₂ используют в комбинации с SiO₂ для многослойных покрытий УФ-диапазона и для усиления отражения покрытий на Al. ThO₂ радиоактивен, и поэтому необходимо соблюдать такие же меры предосторожности, как и при работе с ThF₄.

Пленки ZrO₂ обычно получают электроннолучевым испарением. Полоса пропускания лежит в области $0.34 \div 12$ мкм. Показатель преломления пленок до некоторой степени зависит от температуры подложки (при комнатной температуре $n = 1.97$, при $T_s = 200$ °C $n = 2.05$). При использовании ZrO₂ возникает проблема, связанная с образованием неоднородных пленок, что, вероятно, обусловлено структурными дефектами. Пленки ZrO₂ обладают прекрасными механическими и химическими свойствами и легко совместимы с пленками других окислов и с MgF₂.

Оксиды редкоземельных элементов (La₂O₃, Pr₆O₁₁, Nd₂O₃, Sc₂O₃, Y₂O₃) образуют пленки с показателями преломления от 1.9 до 2.1. Они обладают хорошей прозрачностью в видимой области и в ближней УФ-области спектра. Все эти оксиды испаряют из вольфрамовых лодочек. Реактивное испарение и высокая температура подложки повышает однородность пленок и воспроизводимость их свойств. Все пленки имеют довольно высокую стабильность, за исключением La₂O₃, которые чувствительны к влаге. Sc₂O₃ и Y₂O₃ – наиболее перспективные материалы, так как они сочетают высокую стабильность при средних значениях показателя преломления (~ 1.9) с широкой полосой пропускания.

Пленки CeO_2 получают термическим резистивным и электроннолучевым испарением. Их полоса пропускания простирается от видимой области до ИК-диапазона вплоть до 12 мкм. Пленки CeO_2 , осажденные на более нагретые подложки, обнаруживают слабое поглощение в области 0.4–0.5 мкм. Толстые пленки сильно рассеивают свет, что ограничивает их применение в ИК-диапазоне. Показатель преломления пленок CeO_2 сильно зависит от температуры подложки. Пленки имеют поликристаллическую структуру при любых температурах подложки, а различие в показателях преломления обусловлено различной концентрацией границ зерен, так как при повышении температуры подложки размер кристаллита увеличивается и, следовательно, уменьшается влияние межзеренных границ. Пленки CeO_2 очень стабильны, тверды и обладают высокой адгезией. Вместе с пленками MgF_2 или SiO_2 они используются в многослойных покрытиях высокого отражения.

Пленки TiO_2 тверды, имеют высокую адгезию и химическую устойчивость. Высококачественные пленки TiO_2 можно получить лишь методом реактивного испарения TiO . Пленки прозрачны в видимой и ближней ИК-областях. Толстые пленки TiO_2 обнаруживают рассеяние света в ИК-диапазоне вблизи ~ 3 мкм, что ограничивает их применение в этом диапазоне. Показатель преломления пленок TiO_2 очень сильно зависит от температуры подложки (при изменении температуры наблюдается переход от аморфных пленок к пленкам со структурой анатаза или рутила), а также от условий напыления: скорости конденсации и давления остаточной атмосферы. Поэтому значения показателя преломления TiO_2 колеблются от 1.9 до 2.6. В пленках TiO_2 , полученных реактивным испарением в ионизированном кислороде, наблюдались высокие растягивающие напряжения ($3600\text{--}2200$ кГ/см² в зависимости от толщины пленки). Пленки TiO_2 применяются в интерференционных зеркалах обычно в комбинации с SiO_2 .

Достоинства и недостатки оксидных материалов приведены в табл. 2, а оптические свойства – в табл. 3.

Полупроводниковые материалы

Полупроводники используются в спектральном диапазоне, соответствующем энергиям, меньшим ширины запрещенной зоны. Они обладают высоким показателем преломления.

Пленки Si, Ge и Te получают методом испарения в вакууме (предпочтительнее – электроннолучевое) и методами ионно-плазменного напыления. Структура пленок аморфная, поскольку используются невысокие температуры подложки (до 300 °С). Оптические свойства пленок зависят от многих технологических параметров, таких как температура подложки, скорость нанесения пленки, давление и состав остаточной атмосферы. Влияние условий напыления на показатель преломления пленок не является критическим, поскольку не дает существенных (более 10 %) отклонений его величины, и в сочетании с низкопреломляющим SiO_2 граница раздела SiO_2 /полупроводник дает высокий уровень отражения

Пленки аморфного кремния ($a\text{-Si}$) пропускают в области $1.1 \div 9$ мкм. При $\lambda > 9$ мкм пленки поглощают свет из-за присутствия в них некоторого количества кислорода. При $\lambda = 3$ мкм $n_{\text{Si}} = 3.4$. Пленки кремния тверды и устойчивы.

Пленки аморфного германия ($a\text{-Ge}$) обладают высокой прозрачностью, начиная с $\lambda \cong 2$ мкм и далее в сторону больших длин волн. Показатель преломления пленок германия выше, чем у массивных образцов, и зависит от способа испарения (лодочка или электронный луч), температуры подложки и давления. Для пленок, нанесенных на холодную подложку: $n = 4.4$ при $\lambda = 2$ мкм и $n = 4.3$ при $\lambda = 4$ мкм. Пленки $a\text{-Ge}$ прочны и хорошо совмещаются в многослойных системах с пленками SiO или ZnS .

Пленки Te пропускают в области $4 \div 8$ мкм. Показатель преломления высок (~ 5.5). Однако пленки теллура не обладают высокой механической прочностью.

Достоинства и недостатки полупроводниковых материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Достоинства и недостатки диэлектрических материалов для оптических применений [7]

Материал	Достоинства	Недостатки
Криолит Na_3AlF_6 (соединение NaF и AlF_3)	Прозрачность и низкий коэффициент поглощения в области 0.2–14 мкм; самый низкий показатель преломления, что обеспечивает хороший коэффициент контрастности.	Неоднородность по показателю преломления ~ 0.03 ; зависимость относительной плотности пленки от температуры подложки (при $T_s = 30^\circ\text{C}$ $\rho = 0.88$, при $T_s = 190^\circ\text{C}$ $\rho = 0.92$); растворимость в воде; наличие растягивающих напряжений.
MgF_2	Стабильность; твердость; хорошая адгезия.	Неоднородность по толщине; наличие высоких растягивающих напряжений; несовместимость с пленками других веществ (например с TiO_2).
ThF_4	Прозрачность в области 0.2–15 мкм; механическая и химическая стабильность; возможность получать очень толстые пленки; хорошая совместимость с пленками других веществ (например с ZnS).	Радиоактивность.
LiF	Прозрачность в УФ-области ($\lambda \leq 0.11$ мкм); стабильность.	Растворимость в воде.
ZnS	Хорошая совместимость с фторидами и полупроводниками; высокая адгезия; широкая полоса пропускания; высокая относительная плотность.	Сильная зависимость стабильности от предварительной обработки подложки.
ZnSe	Высокий показатель преломления на 0.55 мкм.	Поглощение в области до 0.46 мкм.
Sb_2S_3	Высокий показатель преломления в красной части видимого диапазона.	Сильное поглощение в коротковолновой области.

Продолжение табл. 2.

SiO ₂	Прозрачность в области 0.2–9 мкм; высокая относительная плотность; хорошая адгезия; очень высокая механическая и химическая стабильность.	
Si ₂ O ₃	Хорошая адгезия; очень высокая механическая и химическая стабильность.	Поглощение в УФ-области спектра.
SiO	Высокая химическая и механическая стабильность.	Поглощение в видимой области
Al ₂ O ₃	Очень высокая твердость и адгезия.	Ограниченность выбора метода изготовления.
MgO		Ограниченная стабильность, невозможность использования в качестве внешнего слоя.
ThO ₂	Прозрачность в УФ-области.	Радиоактивность.
ZrO ₂	Прекрасные механические и химические свойства; совместимость с пленками других окислов и с MgF ₂ .	Неоднородность пленок.
Оксиды элементов редких земель	Хорошая прозрачность в видимой и ближней УФ-области спектра; однородность пленок; воспроизводимость свойств; высокая стабильность; широкая полоса пропускания у Sc ₂ O ₃ и Y ₂ O ₃ .	La ₂ O ₃ чувствителен к влаге.
CeO ₂	Широкая полоса пропускания: от видимой области до ИК-диапазона вплоть до 12 мкм; высокая стабильность и твердость; хорошая адгезия.	Сильное рассеяние света толстыми пленками, что ограничивает применение в ИК-диапазоне; сильная зависимость показателя преломления от температуры подложки.
TiO ₂	Твердость; хорошая адгезия; химическая стойкость; прозрачность в видимой и ближней ИК-областях.	Ограниченность выбора метода изготовления; сильная зависимость показателя преломления от температуры подложки и условий конденсации; наличие растягивающих напряжений.
Si	Твердость; устойчивость; высокий показатель преломления.	Наличие поглощения.
Ge	Высокая прозрачность, начиная с 2 мкм; прочность; высокий показатель преломления; хорошая совместимость с другими пленками.	Некоторая зависимость показателя преломления от условий нанесения пленки.
Te	Высокий показатель преломления.	Низкая механическая прочность.

Применение многослойных диэлектрических пленок и их комбинаций

Для лазерных зеркал в видимой и ближней ИК-областях спектра используются следующие комбинации: ZnS–MgF₂, ZnS–ThF₄, ZnS–Na₃AlF₆, ZnSe–Na₃AlF₆, ZnSe–ThF₄, CeO₂–MgF₂, TiO₂–SiO₂.

Кроме того, интерференционные зеркала изготавливают на основе пленок Si–Al₂O₃, Si–SiO₂. Однако данные 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-MgF_2 , изготовленные для ИК-области спектра, подвержены растрескиванию из-за высоких растягивающих напряжений в пленках MgF_2 .

В последние годы наибольшее распространение получили зеркала на основе $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ и $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$, причем предпочтение отдается обычно первой системе из-за более высокого показателя преломления TiO_2 [5]. Это позволяет формировать покрытия, состоящие из меньшего числа слоев. Однако, с точки зрения устойчивости к лазерному излучению, более эффективными являются зеркальные системы $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$. Об этом свидетельствуют данные табл. 3, 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 [8].

Таблица 3

Параметры устойчивости зеркал на основе TiO_2 , SiO_2 и ZrO_2 при лазерном воздействии [8]

Материалы слоев зеркал	Число слоев	Длина волны, мкм	Порог разрушения, ГВт/см ²	
			Одиночный импульс	Многократное воздействие при частоте повторения импульсов 100 Гц
$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	14	1.32	2	1.5
	22	1.06	1.5	1
	20	0.53	1...1.5	0.3–0.4
$\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$	17	1.32	2	2
	25	1.06	2	2
	17	0.53	2	2

В табл. 4 приведены значения оптических постоянных наиболее распространенных диэлектрических и полупроводниковых пленочных материалов, полученных различными методами. Таблица составлена по данным отечественных и зарубежных работ [9]. 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 [7, 10] и других справочных изданиях.

Для изготовления интерференционных многослойных зеркал наибольшее применение получили методы нанесения пленок в вакууме. 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 оптическим по-

стоянными в промежуточном диапазоне (между относительно низкопреломляющим и высокопреломляющим диэлектриком).

Таблица 4.

Оптические постоянные пленочных материалов [9]

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_3AlF_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	$6.0 \cdot 10^{-6}$ $9.0 \cdot 10^{-5}$	1.06 0.52
ThF_4	ТИ	0.20 - 15	0.57 - 1.5	0.25 - 2	$2.0 \cdot 10^{-6}$ $5.0 \cdot 10^{-6}$	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	$1.0 \cdot 10^{-3}$	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	$2.0 \cdot 10^{-6}$ $1.5 \cdot 10^{-5}$	1.06 0.52
Al_2O_3	ЭЛИ, КР, МР, ВР	0.20 - 11	1.65 - 1.57	0.50 - 1.6	$8.0 \cdot 10^{-6}$ $2.3 \cdot 10^{-5}$	1.06 0.52
U_2O_3	ЭЛИ, ТИ	—	1.95 - 1.77	0.25 - 2	$4.0 \cdot 10^{-3}$	0.25
HfO_2	ЭЛИ, КР	0.25 - 9	2.31 - 1.97	0.25 - 2	$1.6 \cdot 10^{-3}$	0.25
ZrO_2	ЭЛИ, КР	0.25 - 9	2.32 - 1.98	0.25 - 2	$1.0 \cdot 10^{-2}$	0.25
CeO_2	ТИ, ЭЛИ	0.46 - 2	2.52 - 1.92	0.40 - 2	—	—
Ta_2O_5	ЭЛИ, КР, МР, ВР, ОР	0.30 - 2	2.50 - 2.06	0.25 - 2	$8.0 \cdot 10^{-3}$	0.3
TiO_2	ТРИ, ЭЛИ, КР, МР, ОР	0.40 - 3	2.55 - 2.1	0.40 - 1.5	$2.5 \cdot 10^{-4}$ $7.5 \cdot 10^{-1}$	1.06 0.52
ZnS	ТИ, ЭЛИ	0.38 - 25	2.35 - 2.2	0.40 - 5	$3.0 \cdot 10^{-6}$ $2.7 \cdot 10^{-4}$	1.06 0.52
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	$1.5 \cdot 10^{-3}$ $2.0 \cdot 10^{-4}$	0.5 0.7
WO_3	МР, ОР	0.40 - >1	2.2	0.5 - 0.9	$5.0 \cdot 10^{-4}$	0.6
Sc_2O_3	ЭЛИ	0.20 - 10	1.96 - 1.99	0.4 - 1	—	—
Y_2O_3	ЭЛИ	0.20 - 10	1.75	0.4 - 1	—	—
Eu_2O_3	ЭЛИ	0.26 - >1	1.82	0.4 - 1	—	—
La_2O_3	ЭЛИ	0.20 - 10	2.03	0.4 - 1	—	—
Gd_2O_3	ЭЛИ	0.22 - >1	1.98	0.4 - 1	—	—
Tb_2O_3	ЭЛИ	—	1.96	0.4 - 1	—	—
Dy_2O_3	ЭЛИ	0.21 - 10	1.97	0.4 - 1	—	—
Ln_2O_3	ЭЛИ	0.22 - 10	1.93	0.4 - 1	—	—

Продолжение табл. 4.

Er_2O_3	ЭЛИ	0.26 - >1	1.96	0.4 - 1	—	—
Sm_2O_3	ЭЛИ	0.23 - >1	2.09	0.4 - 1	—	—
Ho_2O_3	ЭЛИ	0.22 - >1	1.96	0.4 - 1	—	—
Yb_2O_3	ЭЛИ	—	1.95	0.4 - 1	—	—
Pr_6O_{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.

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. Однако резистивные и электронно-лучевые методы испарения наиболее хорошо отработаны для изготовления интерференционных покрытий.

Для получения покрытия указанными методами вакуумная установка должна обеспечивать высокую однородность пленки по толщине, а также иметь в наличии систему контроля оптической толщины пленки [11].

В данной лабораторной работе получение интерференционных многослойных зеркал осуществляется с помощью установки вакуумного напыления ВУ-1А, внешний вид которой представлен на рис. 6.



Рис. 6. 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. 5.

Таблица 5

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. 6.

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. 5).

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

Таблица 6

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. 7, б приведена *оптическая схема комплекса на отражение*. Студентам предлагается разобрать ее самостоятельно.

Оптическая схема монитора оптических покрытий СП «Солар ТИИ» приведена на рис. 8. 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 $< 1 \text{ нм}$;
- фотометрическая точность $\pm 1.5 \%$;
- дрейф нуля $\pm 0.002 \text{ А}$ 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 $< 3 \text{ нм}$;
- фотометрическая точность $\pm 1.5 \%$;
- дрейф нуля $\pm 0.002 \text{ А}$ 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 многослойного зеркала подразумевает выполнение набора последовательных операций, которые определяются маршрутной картой и технологическими условиями приготовления конкретного покрытия, что предлагается составить студенту самостоятельно.

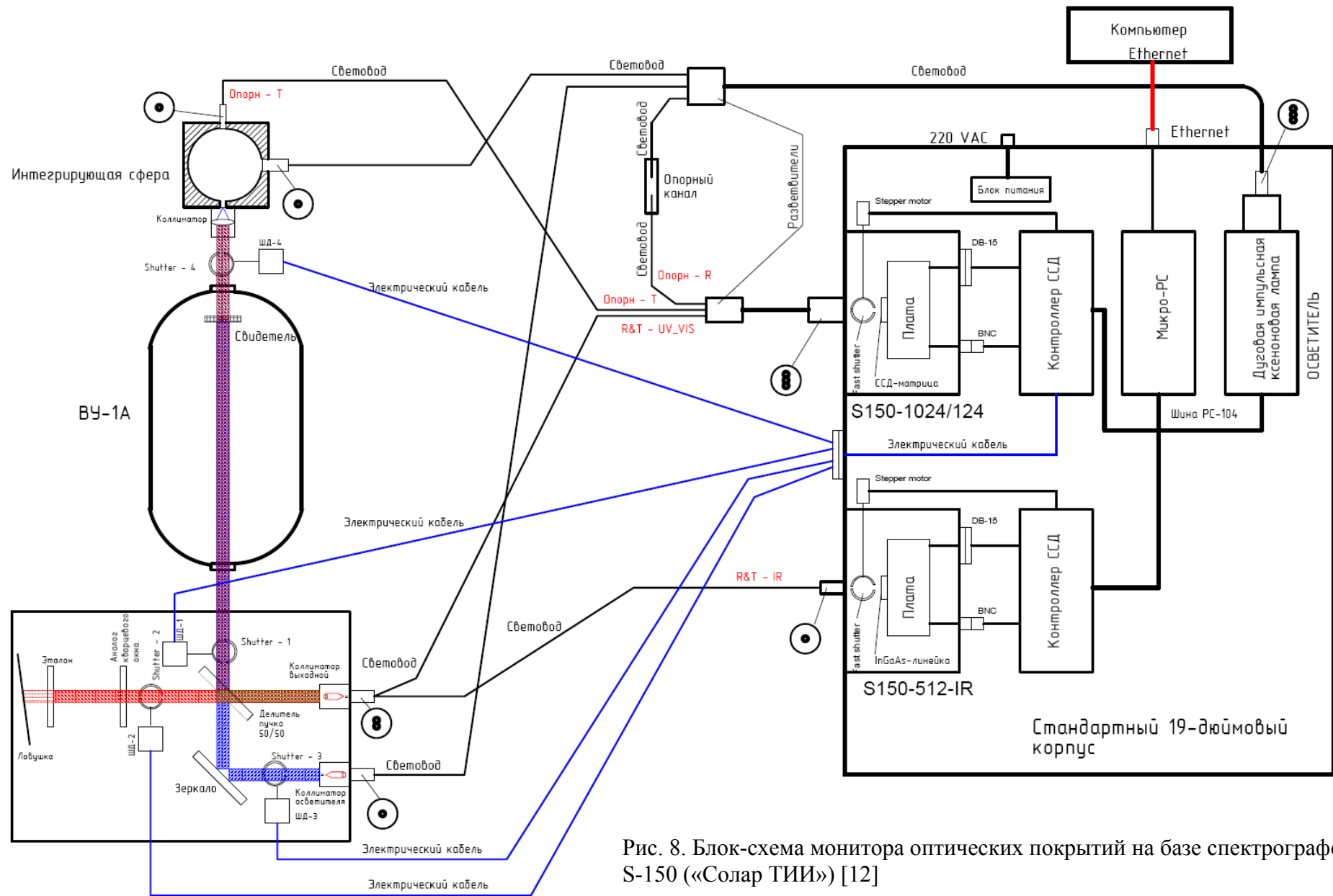


Рис. 8. Блок-схема монитора оптических покрытий на базе спектрографов S-150 («Солар ТИИ») [12]

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 системой фотометрического контроля монитора оптических покрытий на базе спектрографов S-150.
5. Рассчитать интерференционное зеркало с заданными преподавателем параметрами, материалом подложки и диапазоном длин волн.
6. Составить и обосновать технологические условия и порядок изготовления заданного зеркального покрытия.
7. Изготовить необходимое покрытие.
8. Изучить устройство и порядок измерения спектральных характеристик покрытия на спектрофотометрах МДР-204 (ЛОМО Фотоника) для оптического диапазона 400-1200 нм и Cary 5000 для оптического диапазона 1100-3300 нм.
9. Измерить спектральные характеристики экспериментально полученного оптического покрытия.
10. Сравнить полученные результаты с расчетными. Объяснить их. Дать выводы и рекомендации по совершенствованию процесса изготовления заданного зеркала.

ВОПРОСЫ

1. Преимущества диэлектрических зеркал перед металлическими.
2. Особенности многолучевой интерференции в тонких пленках.
3. Как устроены диэлектрические зеркала с очень высоким коэффициентом отражения?
4. Интерференционное многослойное зеркало. Коэффициент отражения.
5. Необходимые технологические условия для изготовления зеркальных покрытий.
6. Фотометрический контроль оптической толщины пленок в технологии интерференционных покрытий.
7. Материалы интерференционных покрытий. Требования и особенности технологии.
8. Параметры, характеризующие интерференционное зеркало, и их измерение.
9. Эксплуатационные требования к интерференционным зеркалам как элементам оптоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы оптоэлектроники / Пер. с японского под ред. К.М. Голанта. – М.: Мир, 1988. – 288 с.
2. Матвеев А.Н. Оптика. – М.: Высш. шк., 1985. – 351 с.
3. Бутиков Е.И. Оптика: Уч. пос. для студ. физических специальн. вузов. – С-Пб.: Невский Диалект, 2003. – 480 с.
4. Федосеев А.И. Спектральные характеристики интерференционных светофильтров и диэлектрических зеркал / Описание лабораторной работы. – М.: МГУ, 1997.
5. Мацкевич Л.Л., Бажинов В.В., Ручинский Н.В. Широкополосные диэлектрические зеркала из окислов титана и кремния // Оптико-механическая промышленность. – 1978. – № 9. – С. 46-47.
6. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
7. 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.
8. 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.
9. Яковлев П.П., Мешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий / Серия: Библиотека приборостроителя. – М.: Машиностроение, 1987 – 185 с.
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

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА
В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ
(Лабораторная работа)

Составители:

Ершов Алексей Валентинович

Карабанова Ирина Алексеевна

Компьютерный набор, рисунки и верстка И.А. Карабановой

Подписано к печати _____ Формат 60×84 1/16

Печать офсетная. Бумага оберточная. Усл. печ. л. 1.6

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
