

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

Институт оптики и оптических технологий

Кафедра наносистем и оплотехники

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ПОКРЫТИЯ И ФИЛЬТРЫ

Новосибирск
СГГА

Введение

Цели и задачи курса. Целью освоения дисциплины «*Покрытия и фильтры*» является формирование у студентов общекультурных и общепрофессиональных компетенций в области освоения принципов разработки и использования офтальмологических и медицинских приборов различного назначения.

Задачами изучения данного курса является приобретение студентами компетенций, связанных с пониманием теоретических и физических основ фильтрации оптического излучения, методах расчета оптических характеристик многослойных систем для последующего использования этих знаний при изучении других дисциплин и при разработке оптических систем и приборов медицинского назначения, а также расширение и углубление базовых знаний об оптических медицинских приборах, методах выбора и расчета основных их параметров.

Дисциплина «*Покрытия и фильтры*» относится к профессионально-ориентированным дисциплинам естественно-научного цикла и обеспечивает содержательную взаимосвязь с общеобразовательными и специальными дисциплинами оптического профиля подготовки.

Материал дисциплины основывается на знаниях, полученных студентами при изучении физики, математики и оптики в объеме курсов "Физика", "Высшая математика" и "Основы оптики". В свою очередь дисциплина служит основой для освоения последующих дисциплин профессионального цикла "Взаимодействие излучения с веществом", "Лабораторные оптические приборы", "Очковая оптика" и "Офтальмологические приборы" и др.

1. Оптические свойства сред и тел, и их взаимодействие с излучением

Основы фотометрии. Системы фотометрических величин. Оптические свойства материалов. Коэффициенты отражения, поглощения и пропускания. Отражение от диэлектриков. Формулы Френеля. Преломление на границе двух сред. Закон Снелля. Отражение под углом Брюстера. Полное внутреннее отражение. Поглощение излучения средой. Законы Бугера-Ламберта и Бэра.

Основы фотометрии.

Системы фотометрических величин и единицы их измерения

Фотометрия – раздел оптики, занимающийся измерением лучистой энергии в процессе ее излучения, распространения и взаимодействия с веществом. Термин фотометрия происходит от слияния 2-х слов: *photos* – свет и *metreo* - измерять.

Фотометрия – наука об изучении и измерении параметров и характеристик переноса энергии оптического излучения. Под лучистой энергией понимается энергия распространяющегося в пространстве электромагнитного излучения оптического диапазона. Свет – электромагнитное излучение той части оптического диапазона, которая способна вызывать зрительные ощущения у человека.

Для числовой характеристики параметров света используется световая система фотометрических величин, тогда как для характеристики параметров излучения во всем оптическом диапазоне применяется энергетическая система величин. Фотометрической величиной называется физическая величина, определяющая временное и пространственное спектральное распределение энергии оптического излучения и свойств веществ, сред и тел как посредников переноса и приемников энергии.

Световая система выработана применительно к видимому излучению и оценки в ней производятся по реакции человеческого глаза (или прибора с той же спектральной чувствительностью). Энергетическая система используется для энергетических измерений независимо от типа приемника излучения.

Энергетические единицы специальных названий не имеют. Все виды энергии измеряются в джоулях (Дж). Основной единицей измерений в энергетической системе величин является единица мощности 1 Вт. В фотометрии мощность 1 Вт равна потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт (механический эквивалент света).

За основную фотометрическую единицу в световой системе принимается единица силы света 1 кандела (кд). С 1979 г. на VI Генеральной конференции мер и весов было принято, что 1 кд представляет собой силу света в заданном направлении от источника монохроматического излучения частоты $5,4 \times 10^{14}$ Гц ($\lambda = 0,555$ мкм), сила которого составляет 1/683 Вт/ср.

Эталон силы света неоднократно менялся, и каждый последующий эталонный излучатель был более стабильным и воспроизводимым по сравнению с предыдущим. Первыми эталонами силы света служили спермацетовые свечи, пламенные излучатели, затем нагретые металлические поверхности и затем электрические лампы накаливания.

С 1948 г. таким эталоном являлся полый излучатель, выполненный из окиси тория, помещенный в расплав платины для защиты от окружающей среды. Использовалась высокотемпературная точка фазового перехода платины. Тогда сила света 1 кандела равнялась 1/60 силы света излучаемого в направлении нормали с 1/60 см² светового эталона. В таблице 1 приведены основные световые и энергетические единицы и их обозначения.

Таблица 1

Величина	Обозначение	Единица световая	Единица энергетическая
Поток	Φ	лм	Вт
Энергия	Q	лм · с	Дж
Сила излучения	$dI = d\Phi/d\omega$	кд	Вт/ср
Освещенность	$dE = d\Phi/ds$	лк	Вт/м ²
Яркость	$dL = dI/ds$	кд/м	Вт/м ² ср
Светимость	$dM = d\Phi/ds$	лм/м ²	Вт/м ²

Связь между световыми и энергетическими единицами устанавливается с учетом спектрального состава излучения. Отношение светового потока в лм к лучистому потоку в Вт называется *коэффициентом видности* V_λ :

$$V_\lambda = \frac{\Phi[\text{лм}]}{\Phi[\text{Вт}]}$$

Коэффициент видности принимает максимальное значение равное $V_{\max} = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$ при $\lambda = 0,555$ мкм, т.е. в области максимальной чувствительности глаза 1 лм = 683 Вт и $1 \text{ Вт} = \frac{1}{683} \text{ лм} = 0,00146 \text{ лм}$. Эта последняя величина носит название механического эквивалента света. На границах видимой области спектра коэффициент видности V_λ стремится к 0.

Полностью зависимость описывается кривой относительной видности или, как ее сейчас называют, кривой спектральной световой эффективности:

$$k_\lambda = \frac{V_\lambda}{V_{\lambda \max}}$$

— коэффициент относительной видности,

причем $k_\lambda = 1$ при $\lambda = 0,555$ мкм.

Спектрофотометрия – раздел фотометрии, в котором параметры и характеристики веществ, сред и тел выражены отношением значений спектральной

плотности фотометрических величин. *Фотометр* – средство измерения фотометрических величин.

В фотометрии большинство измерений обычно выполняются не в абсолютном, а в относительном выражении. Абсолютные измерения затруднены в обычных условиях тем, что требуют предварительной градуировки (калибровки) приемников по эталонным источникам, и проводятся в специализированных метрологических лабораториях. К фотометрическим величинам относятся *коэффициенты отражения, пропускания, поглощения, рассеяния* и т.д.

Относительный способ измерения требует уравнивания световых потоков. Для этого применяются светоослабляющие устройства, которые должны удовлетворять определенным требованиям. Необходимо, чтобы светоослабляющее устройство изменяло световой поток по определенному закону (лучше всего по линейному) и не изменяло при этом спектрального состава излучения (не обладало *селективностью*).

Устройство, основанное на законе квадратов расстояний, является наиболее точным из всех способов плавного изменения световых величин. Действие устройства основано на законе квадратов расстояний, согласно которому освещенности двух поверхностей E_1 и E_2 , отстоящих от источника света на расстояниях r_1 и r_2 , обратно пропорциональны квадратам этих расстояний:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}.$$

Закон квадратов расстояний строго выполняется для точечных источников. Устройство не изменяет спектральный состав излучения и отличается высокой точностью измерений, которая, в свою очередь, определяется точностью измерения расстояний. Для реальных источников точность устройства достаточно высока, если поперечные размеры источника меньше расстояния до освещаемой поверхности в 10 и более раз. Все остальные светоослабляющие устройства градуируются на основе закона квадратов расстояний.

Устройство, основанное на законе косинусов, довольно простое, и его действие основано на том, что освещенность площадки пропорциональна косинусу угла между направлением светового потока и нормалью к освещаемой поверхности. Следовательно, при постоянной силе света I и расстоянии освещенность поверхности можно менять, изменяя угол падения лучей. Иногда применяется в простых визуальных фотометрах:

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}.$$

Вращающиеся секторы применяются для ступенчатого или плавного изменения времени действия излучения источника на инерционный приемник (глаз, фотоприемник и т.д.). Метод основан на том, что глаз, как и целый ряд физических приемников, реагирует на световой сигнал с запаздыванием. Метод

носит название *закона Тальбота*. В первом случае, когда приемником служит глаз, изменяется кажущаяся яркость источника, наблюдаемого через секторный вырез вращающегося диска, а во втором, когда применяется физический приемник, – изменяется время действия светового потока, т.е. количество энергии, переносимой световым излучением.

При частоте прерывания света 100 Гц и более воспринимаемая яркость источника L связана с истинной яркостью L_0 соотношением

$$L = L_0 \frac{n\alpha}{360^\circ},$$

где α – угол секторного выреза;

n – число вырезов в диске.

Меняя α или n , можно ступенчато или плавно изменять наблюдаемую яркость. Эмпирически установлено, что для частот, больших 100 Гц, точность устройства оказывается не зависящей от стабильности его вращения и определяется, в основном, точностью выполнения вырезов.

Такие устройства не меняют спектра излучения источника и применяются в качестве эталонов, обладающих стабильным коэффициентом пропускания. По точности такой метод ослабления светового потока считается вторым после закона квадратов расстояний.

Оптические материалы и покрытия, применяемые при изготовлении оптических деталей

Различные оптические детали, к которым относятся в том числе фильтры, зеркала и пр., пропускают, отражают или поглощают оптическое излучение. И изготавливают из различных оптических материалов, и в зависимости от назначения и от спектральной области работы к ним предъявляются жесткие и зачастую противоречивые требования.

Общие требования к материалам заключаются в том, что они должны обладать отличными оптическими свойствами, хорошими механическими качествами, т.е. быть достаточно твердыми и иметь высокую ударную вязкость (быть не хрупкими). Еще одно важное требование состоит в том, что материалы должны хорошо поддаваться обработке и давать при полировке поверхности высокого качества. Желательны также высокая теплопроводность и небольшой коэффициент линейного теплового расширения, а также нерастворимость в воде, устойчивость к воздействию других растворителей, паров активных веществ и т. д. Кроме того, важна способность материалов удерживать на своей поверхности просветляющие и защитные пленки. Эта способность называется *адгезией* (прилипанием), при которой возникают связи между двумя разнородными поверхностными слоями. Наконец, желательно, чтобы оптические материалы не были чрезмерно дорогостоящими и труднодоступными.

Выбор материалов определяется спектральным диапазоном работы. Самая коротковолновая часть оптического диапазона – вакуумная ультрафиолетовая

(ВУФ) область (от 0,5 до 200 нм). В этой области помимо необходимости вакуумирования из-за сильного поглощения излучения кислородом воздуха, сложности связаны с тем, что нет подходящих твердых веществ, прозрачных для излучения с длиной волны короче 100 нм ($\lambda < 100$ нм). Кварц (SiO_2) непрозрачен уже при 180-200 нм, флюорит (CaF_2) – при 125 нм, фтористый магний (MgF_2) – при 110 – 140 нм и т.д.

Фильтры и окна кювет, из которых откачан воздух, могут быть изготовлены в виде тонких пленок из нитроцеллюлоида, целлюлоида, алюминия, индия или кремния. При толщине 0,08 – 0,1 мкм (80-100 нм) такие пленки пропускают от 20 до 60 % ВУФ излучения. Поэтому, как правило, применяется исключительно отражающая оптика с возможно меньшим количеством поверхностей.

Наиболее высокий коэффициент отражения ρ при $\lambda > 100$ нм имеет алюминий, но в результате окисления (Al_2O_3) в атмосфере его отражающая способность со временем уменьшается. Так для $\lambda \approx 122$ нм в течение одного часа значения снижаются с 85 до 40 %.

Для предохранения алюминиевых пленок от окисления на них наносят тонкие интерференционные покрытия в виде пленок фтористого магния или фтористого лития (LiF). К сожалению, такие пленки неприменимы в области длин волн короче 100 нм, так как сами начинают интенсивно поглощать.

В ближней УФ (БУФ) области (20-400 нм) прозрачен кварц, кварцевое стекло, а также некоторые кристаллы LiF , CaF_2 , NaCl , KBr . Кристаллический кварц характеризуется двойным лучепреломлением и вращением плоскости поляризации, поэтому его применение не всегда возможно, несмотря на отличные оптические и хорошие механические свойства.

Кварц плавленый (кварцевое стекло) не имеет этих недостатков и по оптической однородности почти не уступает кристаллическому. Его получают из расплавленного кристаллического кварца охлаждением до комнатной температуры без кристаллизации. Кварцевое стекло для УФ области, имеет маркировку КУ-1 и КУ-2; окна из некоторых его образцов прозрачны до 150 нм.

Для отражающих покрытий в БУФ используется преимущественно алюминий, который имеет в этом диапазоне коэффициент отражения $\rho \approx 90$ %.

В видимой (400-750 нм) и ближней ИК (0,75-2,7 мкм) областях спектра прозрачные оптические детали изготавливают из оптического силикатного стекла. Отражающие покрытия изготавливаются из алюминия с защитной пленкой, реже из серебра (хотя его коэффициент отражения выше). Часто применяются многослойные диэлектрические покрытия.

В средней ИК (2,7-50 мкм) области спектра обычные оптические стекла непрозрачны. В качестве оптических материалов могут быть использованы некоторые марки специальных бескислородных стекол, а также ряд кристаллов.

Кварцевое стекло для ИК-области имеет маркировку КИ-1, КИ-2 (прозрачно до 3,5 мкм) – влагуустойчивое, сравнительно недорогое, имеет высокую температуру плавления – около 1700°C . Еще применяется мышьяковистое трехсернистое (прозрачно в диапазоне 0,7-11 мкм) и селенисто-мышьяковистое стекло (1 – 25 мкм). Первое из них однородно, легко обрабатывается и полиру-

ется, имеет коэффициент теплового расширения почти такой же, как у алюминия, что облегчает применение алюминиевых оправ, но не является термостойким (разлагается уже при 195°C). Второе – нерастворимо в воде, имеет сильную полосу поглощения от 12 до 13 мкм, ухудшение оптических свойств материала начинается при 70°C .

Кроме того, здесь также прозрачны такие кристаллы, как:

– NaCl (каменная соль) – до 15 мкм; она легко обрабатывается, дешевая, но растворима в воде, гигроскопичная и хрупкая;

– LiF (фтористый литий) – до 9 мкм и CaF_2 (флюорит) – до 11 мкм – хрупкие и невысокой твердости;

– KBr (бромистый калий) – до 40 мкм и KCl (хлористый калий) – 30 мкм (сильвин), оба очень гигроскопичные и мягкие, легко раскалываются и трудно полируются;

– MgF_2 (фтористый магний) – прозрачен до 7,5 мкм, обладает хорошими оптическими и физическими свойствами при повышенных температурах, может быть спаян с нержавеющей сталью;

– BaF_2 (фтористый барий) – до 15 мкм – негигроскопичен, легко обрабатывается, инертен к большинству химических растворителей; наконец;

– CsJ (йодистый цезий) – до 50 мкм, гигроскопичен, мягок, имеет желтоватый цвет, легко раскалывается.

Широкое применение имеют и такие полупроводниковые материалы, как кремний (Si) (область прозрачности от 1 до 12 мкм), имеющий высокий коэффициент преломления ($n = 3$ для $\lambda = 10$ мкм) и высокую температуру плавления (1410°C), и германий (Ge) (от 1,5 до 20 мкм) – дорогой материал с очень высоким показателем преломления ($n \approx 4$); оба материала непрозрачны в видимой области и обладают характерным металлическим блеском.

Отражающие зеркальные покрытия изготавливаются чаще всего из алюминия, имеющего в средней ИК области высокий коэффициент отражения.

Дальняя ИК область спектра (от 50 мкм до 2,5 мм). В этой области снова становятся прозрачными стекло, кварц и др. материалы, непрозрачные в средней ИК области, но наибольшей оптимальными характеристиками обладают полимерные материалы: полистирол, полиэтилен и др. В качестве зеркальных отражателей могут быть использованы полированные или мелко шлифованные поверхности металлов.

Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. – М.: МГУ, 1986 г. – С. 13 – 38.

Ефремов В.С., Шлишевский В.Б. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем. – Новосибирск: СГГА, 2013 г. – С. 184 - 192.

2. Фильтрация оптического излучения и типы оптических фильтров

Общие свойства светофильтров. Абсорбционные фильтры, их типы и особенности. Отражающие фильтры. Интерференционные фильтры. Интерференционно-поляризационные фильтры. Фильтрация с использованием нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Метод селективной модуляции. Солнцезащитные фильтры: равномерные, градиентные, фотохромные.

Оптическими фильтрами или светофильтрами называются оптические элементы, изменяющие спектральный состав и/или энергию падающего светового потока. Особенностью фильтров является то, что при этом они почти не изменяют форму фронта световой волны.

Основной характеристикой фильтров является величина коэффициента пропускания τ , равная отношению прошедшего светового потока к падающему:

$$\tau = \Phi / \Phi_0.$$

Фильтры также часто характеризуют величиной оптической плотности D , которая связана с τ (без учета отражения от поверхности фильтра) соотношением:

$$D = \lg \frac{1}{\tau} = -\lg \tau.$$

Если используется N последовательно установленных фильтров, то без учета многократных отражений в такой системе,

$$\tau_{\Sigma} = \prod_{i=1}^N \tau_i,$$
$$\text{но } D_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N D_i.$$

По назначению фильтры делятся на *нейтральные (серые)* и *селективные*. Фильтры называются серыми или нейтральными, если их светопропускание в исследуемом спектральном интервале не зависит от длины волны; в противном случае фильтры называются селективными.

Основное назначение *серых* фильтров – ослабление светового потока в достаточно широкой области спектра до заданной величины. В ближнем УФ и видимом диапазонах достаточно серыми являются полупрозрачные тонкие пленки алюминия и платины, нанесенные испарением на стеклянную или кварцевую подложку, а также растворы коллоидного графита и некоторых красите-

лей. В ИК области достаточно серыми являются металлические сетки. Следует, однако, иметь в виду, что даже самые лучшие серые фильтры обладают некоторой селективностью.

Селективные фильтры предназначаются либо для отделения широкой области спектра и тогда они называются *отрезающими*, либо наоборот для выделения узкого спектрального интервала и тогда они называются *узкополосными* или *монохроматическими*.

Отрезающие фильтры характеризуются длиной волны $\lambda_{\text{пр.}}$, при которой их пропускание по сравнению с максимальным уменьшается в два раза, а также коэффициентом пропускания τ_{max} . Прекрасным отрезающим фильтром является, например, германий: $\lambda_{1\text{пр.}} = 1,8 \text{ мкм}$, $\lambda_{2\text{пр.}} = 25 \text{ мкм}$ для Ge.

Узкополосные фильтры характеризуются обычно длиной волны λ_{max} , соответствующей максимуму светопропускания, максимальным пропусканием в максимуме τ_{max} и полушириной полосы пропускания, за которую принимается интервал длин волн, ограниченный точками $\tau_{\text{max}}/2$.

Лучшие узкополосные фильтры изготавливаются на основе многослойных интерференционных диэлектрических покрытий и имеют ширину полосы пропускания менее $0,1 \text{ нм}$. Однако их пропускание в максимуме также мало (не превышает 15 %). Кроме того, в силу периодичности явления интерференции, они обладают дополнительными побочными максимумами пропускания, для подавления которых требуются дополнительные отрезающие фильтры, еще более уменьшающие светопропускание системы:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\text{max}} \tau_{\text{отр1}} \tau_{\text{отр2}}$$

Поэтому такие фильтры применяются сравнительно редко. Полоса же пропускания рядовых узкополосных фильтров значительно шире и составляет десятки нанометров. Помимо перечисленных типов довольно часто используются так называемые *корректирующие* фильтры, предназначенные для изменения спектрального состава излучения источников или спектральной чувствительности приемников излучения.

С их помощью можно, например, достаточно точно приблизить спектр лампы накаливания к сплошному спектру Солнца или спектральную чувствительность фотоэлемента привести в соответствие со спектральной чувствительностью глаза.

По принципу действия фильтры делятся на абсорбционные, отражающие, интерференционные, дисперсионные и др. Наиболее широко применяются абсорбционные фильтры, в которых ослабление оптического излучения происходит, главным образом, в результате поглощения излучения веществом фильтра. Из принципа действия вытекает непосредственно основной недостаток таких фильтров – их нагрев.

Помимо поглощения ослабление света обуславливается также френелевским отражением от поверхности фильтра (в большинстве случаев оно невелико,

а,главное, - почти не селективно), и рассеянием в объеме и на поверхностях фильтра, чем обычно вовсе пренебрегают.

Как известно, световой поток, прошедший через плоскопараллельный поглощающий слой, ослабляется в соответствии с законом Бугера-Ламберта:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\chi l},$$

где χ – показатель поглощения, [см⁻¹, мм⁻¹];

l – толщина поглощающего слоя, [см, мм].

Закон Бугера-Ламберта справедлив практически всегда, за исключением очень больших плотностей светового потока, которые могут иметь место в лазерах. Он выполняется не только для монохроматического излучения, но и в случае интегральной засветки.

С учетом потерь на отражение коэффициент светопропускания фильтров может быть представлен на основании закона Бугера-Ламберта в виде:

$$\tau = (1 - \rho)^2 e^{-\chi l},$$

где ρ – коэффициент отражения света поверхностью фильтра.

Выражение в круглых скобках возведено в квадрат за счет того, что отражение происходит на обеих поверхностях фильтра. Обычно фильтры изготавливаются в виде плоскопараллельных пластинок или кювет; в этом случае вся их поверхность обладает одинаковым пропусканием. Иногда фильтры имеют иную форму: например, их делают в виде трубок, охватывающих источник света или облучаемый объект. Тогда сама колба источника имеет фильтрующие свойства (медицинские кварцевые лампы).

В общем случае поглощающий фильтр постоянной толщины по-разному ослабляет наклонные лучи, падающие под разными углами.

Здесь имеет место следующая приближенная зависимость:

$$\frac{\Delta\tau_\lambda}{\tau_\lambda} \approx 1,2D_\lambda \frac{\sin^2 \alpha}{n^2},$$

где $\Delta\tau_\lambda$ – изменение коэффициента пропускания фильтра;

D – оптическая плотность;

n – показатель преломления материала фильтра;

α – угол падения лучей на поверхность фильтра.

Например: пропускание стеклянного фильтра с $n = 1,5$ и $D_\lambda = 2$ для лучей, падающих под углом $\alpha = 30^\circ$, на 27 % меньше, чем при нормальном падении ($\alpha=0$). Это говорит о том, что при количественных измерениях обязательно необходимо учитывать влияние угла падения на изменение коэффициента пропускания для наклонных пучков.

Из абсорбционных фильтров наиболее распространены *стеклянные светофильтры*. По сравнению с другими они обладают рядом преимуществ, в которых, в первую очередь, следует отнести устойчивость к световым и тепловым воздействиям, однородность, высокое оптическое качество. Отечественной промышленностью выпускаются наборы селективных и нейтральных фильтров размером $80 \times 80 \text{ мм}^2$ или $40 \times 40 \text{ мм}^2$, состоящие из 117 паспортизованных образцов.

Комбинируя эти фильтры можно получить достаточно узкополосные фильтрующие системы для всей видимой и ближней УФ области спектра. В таблице 1 приведены наборы фильтров для выделения наиболее ярких линий ртутного спектра, а в таблице 2 – комбинации стекол для *корректирующих* фильтров, преобразующих энергии излучения ламп накаливания с цветовой температурой 2854 К (источник типа А) в излучение стандартных источников дневного света типа В (с цветовой температурой 4800 К) и С (6500 К). Отметим также, что фильтр, состоящий из стекол ЗС8 (толщина 1,9 мм) и ЖЗС 18 (толщина 2,1 мм) приводит спектральную кривую чувствительности селенового фотоэлемента к спектральной чувствительности глаза.

Жидкостные светофильтры гораздо менее удобны, чем стеклянные, поэтому применяются довольно редко. Основное неудобство использования таких фильтров связано с необходимостью применения кювет. Кроме того, при нагреве от поглощаемого излучения они становятся оптически неоднородными из-за конвекции.

Зато ценным свойством жидкостных фильтров является возможность плавного изменения толщины поглощающего слоя и, следовательно, коэффициента светопропускания. Кюветам со светопропускающей жидкостью можно легко придать нужную форму, и тогда светофильтрующая жидкость может служить, например, одновременно для охлаждения источника света. Иногда жидкостные фильтры дают большие возможности для получения спектральных кривых пропускания нужной формы, чем стеклянные. В качестве светопропускающих жидкостей обычно используют растворы солей металлов.

Таблица 2 – Комбинации фильтров для выделения линий Hg

λ , нм	Обозначение	Толщина, мм	Чистота выделения, %
303-313	ЖС 3 УФС 2	4,0 2,0	99,0
365	БС 7 УФС 6	1,2 3,0	99,8
405	ЖС 10 ПС 13	$\lambda_{\text{пр}} 390 \text{ нм}$ 4,5	99,4
436	ЖС 12 СС 15	$\lambda_{\text{пр}} 435 \text{ нм}$ 2,0	99,8
546	ОС 11	$\lambda_{\text{пр}} 535 \text{ нм}$	99,1

	ПС 7 СЗС 21	5,0 5,0	
578	ОС 13 ЗС 7	$\lambda_{\text{пр}} 565 \text{ нм}$ 3,0	99,3

Таблица 3 – Комбинации фильтров для преобразования излучения ламп накаливания в излучение стандартных источников дневного света

Марки стекол	Толщина стекол для преобразования в излучатели типа В и С, мм	
	В, $T_{\text{цв}} = 4800 \text{ К}$	С, $T_{\text{цв}} = 6500 \text{ К}$
СЗС 17	5,1	6,95
ПС 5	5,85	7,4
ПС 14	4,8	6,6

Цветовая температура – это температура абсолютно черного тела (АЧТ), при которой его излучение имеет ту же цветность, что и рассматриваемое излучение.

Газовые светофильтры представляют собой герметичные кюветы, наполненные газами или парами металлов и часто оказываются незаменимыми из-за чрезвычайной избирательности их спектров.

Для выделения УФ области спектра широко применяются кварцевые кюветы с насыщенными парами брома при комнатной температуре. Такая кювета практически непрозрачна в видимом диапазоне 400-600 нм. Добавление в нее же хлора при давлении 1-2 атм. приводит к тому, что она становится непрозрачной от 290 нм. Естественным газовым фильтром является воздух, непрозрачный для длин волн короче 180 нм.

Кюветы с парами легколетучих металлов (Hg, Cs, K, Na и др.) применяются для исключения из исследуемого спектра резонансных линий этих металлов, что необходимо делать, например, при исследовании фотолюминесценции, комбинационного рассеяния и т. д.

Полупроводниковые фильтры непрозрачны для длин волн, меньших некоторой $\lambda_{\text{пр}}$, обусловленной строением атома соответствующего химического элемента. Таким образом, полупроводники являются прекрасными отрезающими светофильтрами, резко ограничивающими спектр с коротковолновой стороны. Лишь у немногих полупроводников край поглощения лежит в видимой области спектра; тогда как большинство из них прозрачно только в ИК диапазоне.

Сетки, хотя по существу не являются абсорбционными фильтрами, но по своим свойствам близко примыкают к ним. В отличие от абсорбционных фильтров пропускание сеток не аддитивно; общее пропускание двух сеток сильно зависит от угла падения лучей и довольно трудно поддается строгому учету. Сетки широко применяются в ИК диапазоне как неселективные ослабители; лучше всего их располагать в параллельном пучке и по одиночке.

Отражающие фильтры в отличие от абсорбционных ослабляют световую энергию за счет отражения при малом собственном поглощении. Благодаря этому они нагреваются под действием излучения в значительно меньшей степени.

Металлические пленки используются в качестве нейтральных и селективных светофильтров. Как правило, их наносят на стеклянную или кварцевую подложку. Для получения нейтральных ослабителей обычно используют платину, палладий или родий, реже – алюминий. Для выделения различных участков УФ диапазона применяют пленки серебра и щелочных металлов; области их пропускания приведены в таблице 3. Пленки рубидия (Rb) и (Cs) устойчивы только при пониженных температурах, а все остальные работают и при комнатной.

Таблица 4 – Отражающие фильтры для УФ области

Металл	Na	K	Rb	Cs	Li	Ag	Au
Область пропускания, нм	125-210	170-315	186-360	186-440	≈ 205	310-340	450-530

Поскольку металлические пленки изменяют свое пропускание под действием атмосферного воздуха, их обычно герметически заделывают между стеклянными или кварцевыми пластинами, либо наносят на них защитные покрытия.

Многослойные диэлектрические покрытия дают зеркала с высоким коэффициентом отражения. До определенного уровня (в зависимости от технологии) чем больше число слоев, тем выше коэффициент отражения. С другой стороны, чем больше разность показателей преломления слоев, тем шире область отражения.

Тонкие пленки наносятся на оптические поверхности распылением в вакууме или химическим осаждением. Многослойные диэлектрические зеркала работают как селективные отражающие фильтры. Они получают последовательным нанесением на прозрачную подложку тонких (как правило, кратных по толщине $\lambda/4$) слоев с высокими (2,2-2,3) и низкими (1,3-1,4) показателями преломления. Число слоев может достигать 50 и даже 100. Комбинируя слои различной толщины, можно в более или менее широких пределах синтезировать спектральные кривые отражения, а, следовательно, и пропускания таких зеркал. В качестве материалов для покрытий наиболее часто применяются: криолит Na_3AlF_6 , MgF_2 , SiO_2 , BaF_2 , SrF_2 с $n = 1,3-1,4$ и PbCl_2 , PbF_2 , TiO_2 , ZnS с $n = 2,2-2,3$.

Матированные зеркала применяются в качестве отрезающих фильтров с коротковолновой стороны. Они представляют собой стеклянную подложку, обработанную абразивами с определенным размером зерен, обычно в пределах от 2 до 20 мкм, покрытую тонким слоем металла. Излучение с длинами волн, превосходящими размер зерна, отражается зеркально, остальное – рассеивается диффузно и легко может быть устранено диафрагмами. Подобные фильтры могут быть изготовлены для любой длины волны. Однако их обычно используют

в области $\lambda > 25$ мкм, где имеются затруднения с другими видами светофильтров, а изготовление поверхностей с крупным зерном здесь не представляет трудностей. Особую ценность представляют такие фильтры для диапазона $\lambda > 200$ мкм.

Интерференционные светофильтры. Простейший интерференционный светофильтр состоит из двух параллельных, частично прозрачных зеркал, разделенных тонким диэлектрическим слоем. Фактически это интерферометр Фабри-Перо с очень малым промежутком между зеркалами (порядка длины волны). Излучение, проходящее через фильтр, испытывает многократные отражения между зеркальными поверхностями и при каждом отражении частично выходит наружу. На выходе системы образуется множество убывающих по амплитуде лучей с равной разностью хода между ними, которые интерферируют между собой.

Интерферометр имеет ряд полос пропускания, максимумы которых соответствуют длинам волн:

$$\lambda_{\max 1} = \frac{2\Delta}{1}, \lambda_{\max 2} = \frac{2\Delta}{2}, \dots \lambda_{\max n} = \frac{2\Delta}{n},$$

где Δ – оптическая толщина интерферометра.

Фильтр, предназначенный для выделения первой, наиболее длинноволновой полосы пропускания, называют фильтром первого порядка. Он имеет оптическую толщину $\Delta = \lambda/2$ и требует подавления коротковолновых максимумов с длинами волн $\lambda/2$, $\lambda/3$ и т.д. Обычно для этого используют дополнительный абсорбционный фильтр или поглощение материала подложки фильтра.

Интерференционные светофильтры нашли широкое применение в качестве узкополосных монохроматических фильтров.

Дисперсионные (мелкодисперсные) фильтры. Фильтры такого рода представляют собой слой, состоящий из мелких частичек какого-либо вещества, взвешенных в другом веществе. Если кривые дисперсии $n(\lambda)$ этих двух веществ пересекаются при длине волны $\lambda_{\max}$, то излучение этой длины волны проходит через слой как через однородное вещество, тогда как излучение других длин волн рассеивается.

Ширина и форма полосы пропускания фильтра зависят от крутизны пересекающихся кривых дисперсии, а также от размеров частиц. Наилучшие результаты достигаются, когда кривые дисперсии в точке пересечения имеют сильно различающиеся наклоны, а размеры частичек сравнимы с длиной волны.

Отношение $\lambda_{\max}/\Delta\lambda$ для лучших дисперсионных фильтров может достигать до 20, но обычно имеет значения от 5 до 10. Дисперсионные фильтры могут быть трех типов: «кристалл-воздух», «кристалл-жидкость», «кристалл-кристалл». Набор веществ, пригодных для таких фильтров, очень велик. Главным образом, они находят применение в ИК области спектра.

Например, для создания системы «кристалл-кристалл» спрессовывают до однородной смеси порошки 2-х кристаллических веществ в вакууме под боль-

шим давлением. Примеры веществ для создания смесей: $\text{SiO}_2 - \text{KCl}$, $\text{BaSO}_4 - \text{NaCl}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{KCl}$, $\text{PbF}_2 - \text{KI}$, $\text{PbF}_2 - \text{KBr}$, $\text{PbF}_2 - \text{KCl}$ и т.д.

Еще один метод фильтрации оптического излучения основан на использовании *нарушенного полного внутреннего отражения* (НПВО). Этот метод основан на специфических эффектах, возникающих при наклонном падении волны на границу раздела диэлектриков. При *полном внутреннем отражении* поле волны частично выходит за отражающую грань в виде так называемых *поверхностных волн*.

Если к границе диэлектрика приблизить другую диэлектрическую поверхность на расстояние $d \approx \lambda$, то поле проникает во второй диэлектрик и создает в нем обычную распространяющуюся волну. Часть энергии излучения из первого диэлектрика оказывается переданной во второй. Расстояние, на котором можно «перехватить» поле, тем больше, чем больше длина волны излучения. При установке вблизи друг друга двух диэлектриков длинноволновое излучение проходит сквозь них, а коротковолновое испытывает полное внутреннее отражение.

Метод НПВО можно использовать в тех областях спектра, где имеются прозрачные вещества, необходимые для изготовления призм. Однако в видимом и ближнем ИК диапазонах возникают затруднения, связанные с необходимостью обеспечивать очень тонкий зазор между призмами, а в средней и дальней ИК областях весьма ограничен выбор подходящих материалов.

Если регистрация сигнала осуществляется с помощью фотоэлектрических приемников на переменном токе, то появляется дополнительная возможность *фильтрации излучения с помощью селективной модуляции*. Его принцип действия можно пояснить на следующем примере. Допустим, имеется стеклянный механический модулятор. При его вращении происходит попеременное прерывание светового пучка. Излучение видимого и ближнего ИК диапазонов свободно пропускается стеклом и потому не модулируется. Для излучения средней ИК области стекло непрозрачно, и световое излучение достигает приемника только при выведенном из пучка модуляторе. В результате, излучение среднего ИК диапазона оказывается промодулированным. Приемно-регистрирующая система, настроенная на частоту модуляции, регистрирует только эту переменную составляющую, соответствующую среднему ИК диапазону. Следовательно, получается селективный отрезающий фильтр.

Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии. – М.: МГУ, 1986 г. – С. 148 – 162.

Ефремов В.С., Шлишевский В.Б. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем. – Новосибирск: СГГА, 2013 г. – С. 168 - 173.

Федотов Г.И., Ильин Р.С., Новицкий Л.А. и др. Лабораторные оптические приборы. – М.: Машиностроение, 1979 г. – С. 255 - 265.

3. Анализ оптических покрытий. Их типы, характеристики и общие свойства

Общие свойства покрытий. Оптические и спектральные характеристики однослойных, двухслойных, трехслойных и многослойных систем, образованных прозрачными, непрозрачными и слабо поглощающими слоями. Просветляющие, зеркальные, поляризующие и фильтрующие покрытия. Однослойные покрытия при наклонном падении света. Условие просветления. Просветляющие покрытия с кратными и некратными оптическими толщинами. Отражательная способность двухслойных и трехслойных диэлектрических зеркал. Четверть волновые зеркала и их свойства.

Почти на все преломляющие и отражающие поверхности оптических деталей наносят различного рода *покрытия*— тонкие пленки различных веществ: металлов, окислов металлов, диэлектриков, кремнийорганических соединений и пр., что позволяет изменять оптические характеристики деталей, придавать им новые необходимые физические свойства.

Прежде всего, покрытия позволяют управлять интенсивностью пропущенного и отраженного излучения, изменять его спектральный состав, состояние поляризации и фазовые характеристики. С их помощью можно также существенно повысить механическую и химическую устойчивость оптической поверхности, изменить ее электрические свойства и т. д.

Покрытия могут быть одно-, двух-, трех- и многослойными, состоящими из чередующихся слоев пленок различных веществ, которые наносятся либо химическими методами, когда исходное пленкообразующее вещество претерпевает изменение своего химического состава, либо испарением пленкообразующих материалов в вакууме (физические методы).

В зависимости от назначения и физических свойств покрытия делят на *следующие основные типы*: просветляющие, отражающие, фильтрующие (интерференционные фильтры), светоделительные, спектроделительные (дихроичные), светопоглощающие, поляризующие, защитные, токопроводящие.

Свойства каждого из указанных типов покрытий определяются конструкцией интерференционных систем (числом слоев, их последовательностью, толщинами, показателями преломления и др.), методом нанесения слоев (химическим или физическим), их природой и материалом самой оптической детали (подложки). Стабилизация технологических параметров и соответствующий контроль режимов нанесения слоев в процессе формирования покрытий обеспечивают высокую воспроизводимость их характеристик.

В настоящее время расчет практически всех типов покрытий выполняется с помощью прикладных компьютерных программ.

Просветляющие покрытия. Отражение от рабочих поверхностей прозрачных оптических деталей иногда значительно уменьшает количество света, проходящего через многолинзовую оптическую систему; кроме того, образующиеся

при отражении блики снижают контраст и ухудшают качество изображения. Для борьбы с этими негативными явлениями широко используют *просветление оптики*.

Эффект просветления достигается созданием на преломляющей поверхности оптической детали прозрачной пленки с более низким показателем преломления n_1 , чем показатель преломления материала детали n .

Физическая основа процесса просветления связана с явлением интерференции световых колебаний. Излучение, отраженное на границе раздела «воздух-пленка», интерферирует с излучением, отраженным на границе раздела «стекло-пленка». При условии равенства амплитуд и сдвиге колебаний по фазе, равном $\lambda/2$, две отраженные волны могут подавить одна другую. Для выполнения этих условий коэффициент отражения от наружной поверхности пленки

$\rho_1 = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2$ и коэффициент отражения от границы раздела «пленка-подложка»

$\rho_2 = \left(\frac{n - n_1}{n + n_1} \right)^2$ должны быть равны между собой:

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

откуда устанавливается требование $n_1 = \sqrt{n}$.

Минимальная толщина пленки d определяется из условия, что *оптическая разность хода* лучей в пленке составляет $\lambda/2 = 2dn_1$; следовательно, *геометрическая толщина* просветляющей пленки равна $d = \lambda/4n_1$, а *оптическая* – $n_1d = \lambda/4$; такие тонкие слои с оптической толщиной $\lambda/4$ называют четвертьволновыми слоями, или слоями $\lambda/4$.

Однослойное просветляющее покрытие теоретически позволяет полностью исключить отражение излучения от поверхности детали для одной определенной длины волны. В качестве расчетной выбирают длину волны λ_0 , расположенную вблизи середины рабочего спектрального диапазона (для видимой области спектра обычно принимается $\lambda_0 = 540$ нм).

При просветлении кронового стекла с $n \approx 1,50$ необходима пленка из вещества с $n_1 \approx 1,22$. Однако веществ, образующих прочные, стойкие в эксплуатации прозрачные пленки, с таким малым показателем преломления нет. Наиболее близкие значения n имеют пленки фтористого магния MgF_2 ($n_1 \approx 1,38-1,40$) и криолита Na_3AlF_6 ($n_1 \approx 1,32-1,35$). Просветляющие покрытия из них снижают остаточное отражение на поверхности детали из кронового стекла при однослойном просветлении до 1,33 % и 0,75 % соответственно. Для материалов с большими показателями преломления эффект от просветления теми же пленками оказывается еще заметнее.

Для уменьшения отражения в инфракрасной области спектра на детали из

материалов с показателями преломления $n \geq 3,5$ (германий, кремний, арсенид галлия и др.) наносят покрытия из пятиоксида ниобия, диоксида церия и сернистого цинка, а также из окислов титана, циркония, гафния и вольфрама или их смеси с двуокисью кремния. На детали, работающие в сложных условиях эксплуатации, в том числе во влажном тропическом климате, наносят защитную пленку двуоксида кремния.

Эффект просветления усиливается, если вместо одной нанести несколько чередующихся слоев (пленок) с низким и высоким показателями преломления.

У *двухслойного* просветляющего покрытия при оптической толщине слоев $\lambda/4$ отраженная составляющая полностью гасится при выполнении условия $n_2/n_1 = \sqrt{n}$, где n_1 и n_2 – показатели преломления соответственно первого и второго слоев покрытия. В качестве пленок в таких случаях используют слои SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 и др. в зависимости от рабочего участка спектра. В результате реальный коэффициент отражения в окрестности заданной длины волны может быть снижен до $\approx 0,5\%$.

Однослойные и, особенно, двухслойные просветляющие покрытия обладают заметной *селективностью*. При значительном снижении коэффициента отражения в узкой расчетной части спектра на других участках спектра коэффициент отражения увеличивается и может быть даже большим, чем у непросветленной детали. Поэтому в оптических системах, у которых требуется высокое светопропускание во всей рабочей области, применяют *многослойные ахроматические* просветляющие покрытия, позволяющие уменьшить остаточное отражение до значений не более $0,8\%$ в спектральном интервале с относительно большой протяженностью.

В качестве ахроматических просветляющих покрытий, как правило, используют трехслойные (с толщиной пленок $\lambda/4 + \lambda/2 + \lambda/4$) и реже пятислойные покрытия, образованные тугоплавкими пленкообразующими веществами.

Технологический процесс нанесения ахроматических покрытий значительно более трудоемок, чем процесс нанесения одно- и двухслойных просветляющих покрытий, и требует довольно сложного оборудования.

В *таблице 5* приведены усредненные значения коэффициентов отражения от плоских поверхностей стекол с различными показателями преломления без просветления и с различными типами просветляющих покрытий при нормальном падении светового пучка.

Таблица 5 – Усредненные коэффициенты отражения от плоских поверхностей оптических стекол с различными просветляющими покрытиями

Поверхность стекла, граничащая с воздухом	Интервал значений n	Коэффициент отражения ρ
Без просветления	$n < 1,50$	0,040
	$1,50 < n < 1,60$	0,054
	$1,60 < n < 1,70$	0,067
	$1,70 < n < 1,80$	0,080
	$1,80 < n < 2,00$	0,100

С однослойным просветлением химическим методом	$n < 1,52$	0,012
	$1,52 < n < 1,55$	0,016
	$1,55 < n < 1,60$	0,019
	$1,60 < n < 1,64$	0,021
	$1,64 < n < 1,70$	0,025
	$n > 1,70$	0,029
С однослойным просветлением физическим методом	$n < 1,55$	0,006
	$1,55 < n < 1,60$	0,009
	$1,60 < n < 1,65$	0,010
	$1,65 < n < 1,70$	0,014
	$n > 1,70$	0,016
С двухслойным просветлением	Не оговаривается	0,011
С трехслойным просветлением		0,007

Отражающие покрытия (зеркала) используют для изготовления оптических деталей, отражающих излучение в заданной части спектра. В абсолютном большинстве случаев используются зеркала с *наружным отражающим покрытием*, поскольку зеркала с внутренним отражением дают паразитный блик за счет отражения световых пучков от первой поверхности. и вносят хроматизм в систему из-за различного преломления на ней, а спектральный диапазон их работы ограничен областью прозрачности материала подложки.

Спектроразделительные покрытия (*спектроразделители*) предназначены для разделения падающего пучка на отраженный и проходящий *различного спектрального состава*. Типичным примером таких покрытий могут служить многослойные *дихроичные зеркала*, селективно отражающие (и пропускающие) излучение с *определенными длинами волн*, которые применяются для разделения излучения на два пространственно разнесенных *спектральных* канала. Размещая по ходу светового пучка несколько спектроразделителей, можно сформировать соответствующее число различных спектральных каналов; такие комбинации широко применяются в мультиспектральных системах.

Светопоглощающие покрытия состоят из собственно поглощающего слоя, например, «хром-диоксид кремния», «алюминий-фторид магния» и др., нанесенного на полированную поверхность, и антиотражающего покрытия – интерференционной системы из одного или двух слоев, обеспечивающей уменьшение отражения. Они применяются при создании светозащитных устройств приемников излучения, преобразователей солнечной энергии и т. п.

Сравнительно недавно появились новые высокоэффективные противоотражающие покрытия на основе полимеров. В частности, предлагается использовать специальные целлофановые пленки для оптических деталей из германия других материалов, работающих в диапазонах 3-5 и 8-12 мкм. Коэффициенты отражения поверхностей, покрытых такими пленками, составляют 1-3 %. Все *светопоглощающие покрытия* обладают высокими эксплуатационными параметрами.

Поляризующие покрытия представляют собой многослойные покрытия из чередующихся слоев пленок с большим и малым показателями преломления, например, $\text{ZnS-Na}_3\text{AlF}_6$, расположенные относительно направления светового

потока под углом полной поляризации. Поляризующие покрытия наносят на грань стеклянной призмы и заклеивают его с другой стороны призмой, идентичной первой. Доля поляризованного света в отраженном и проходящем пучках составляет до 99 %.

Защитные прозрачные покрытия предохраняют полированные поверхности химически нестойких материалов от разрушения и образования налетов в процессе эксплуатации. Для этой цели на поверхность детали часто наносят прозрачную химически устойчивую пленку окислов кремния и ряда других веществ. Распространенным видом защитного покрытия является прогрев детали в расплавленном пчелином воске при температуре 230 °С. Просветляющие покрытия, нанесенные на поверхность химически нестойких стекол, также выполняют функцию защитного покрытия.

Защита металлических зеркал для инфракрасного диапазона спектра от воздействия влаги воздуха и механических повреждений осуществляется слоями на основе тантала, ниобия и церия. Покрытия получают методом реактивного ионно-плазменного распыления металлов в кислороде. Те же покрытия используют для повышения прочности полупроводниковых и халькогенидных интерференционных вакуумных слоев.

В последнее время интенсивно разрабатываются условия вакуумного осаждения углеродсодержащих алмазоподобных покрытий, отличающихся повышенной твердостью. Углеродсодержащие покрытия используют в качестве защитных слоев для алюминиевых и медных зеркал, оптических волокон, для просветления германия и кремния, как защитные и составляющие слои для диэлектрических покрытий. Эффективно их применение и в качестве селективно поглощающих покрытий для солнечных батарей, а также для ориентации жидких кристаллов.

Электропроводящие (токопроводящие) прозрачные пленки используют как омическое сопротивление (которое можно менять, варьируя толщиной пленки) для обогрева деталей с целью устранения их запотевания и обледенения или как проводник для удаления статических электрических зарядов, образующихся при облучении детали потоком мощного электромагнитного излучения. Их применяют также как теплофильтры, пропускающие излучение видимой части спектра (до 75 %) и отражающие инфракрасное излучение (до 80 %). Получают токопроводящие покрытия нанесением на подложку тонких слоев окислов металлов – олова, кадмия, индия, тория и др., которые в тонких (до 0,5 мкм) слоях имеют высокую электрическую проводимость при хорошей прозрачности. Вследствие высокого показателя преломления пленки ($n \approx 2$) коэффициент отражения от поверхности детали при этом увеличивается до 12-15 %, однако все токопроводящие пленки допускают нанесение просветляющих покрытий, вследствие чего светопропускание повышается.

Для каждого вида покрытий в нормативно-технических документах приводятся характеристики его термических свойств, механической прочности и влагоустойчивости, которые необходимо учитывать при выборе покрытия и определения его функциональной пригодности к конкретным условиям эксплуатации той или иной детали.

Под *механической прочностью* покрытия понимают его способность выдерживать механические воздействия — протирку, воздействие пыли и др. Отечественными стандартами определены пять групп механической прочности покрытий:

группа 0 — особо прочные (допускается протирка тканью с применением растворителей и без них в полевых условиях);

группа I — прочные (допускается чистка ватой или салфеткой с применением органических растворителей);

группа II — средней прочности (требуется осторожность при чистке ватой или салфеткой с применением органических растворителей);

группа III — непрочные (механическая чистка не допускается);

группа IV — механически и химически непрочные (требуется обязательная защита после нанесения).

Наибольшей механической прочностью (0-I группы) характеризуются слои оксидов металлов. Механическая прочность слоев фторидов, сульфидов, селенидов и целого ряда других соединений относится к I-III группам в зависимости от состава и технологии нанесения.

Влагоустойчивость покрытий оценивается способностью пленки выдерживать без повреждений и изменения оптических свойств воздействие в течение 10 суток влажной атмосферы (95-98 % относительной влажности при температуре 40 ± 2 °C), а также устойчивостью к пятнаемости при попадании на поверхность капель пресной и морской воды. Наибольшей влагоустойчивостью обладают слои оксидов, наименьшей — слои ряда фторидов (например, CaF_2 , криолит) и других гигроскопических материалов.

Термическая прочность определяется максимальной температурой, при которой пленка не теряет своих свойств, а также способностью выдерживать термудар при перепаде температур от -60 до $+60$ °C. Наибольшей устойчивостью обладают мало напряженные конструкции покрытий с хорошей адгезией, в частности, слои оксидов металлов.

Как уже говорилось, покрытия на оптические детали наносят *химическими* и *физическими* методами; их выбор определяется требованиями к покрытиям и технологическими возможностями их производства.

К химическим относят те методы, при использовании которых исходное пленкообразующее вещество претерпевает изменение своего химического состава — либо выделяет отдельные составляющие компоненты, либо вступает в реакцию с материалом подложки. В настоящее время технологически хорошо отработаны и наиболее распространены следующие химические методы нанесения покрытий.

Травление — поверхность детали, изготовленной из стекла, содержащего кремнезем, обрабатывается слабым 0,5-процентным раствором уксусной или азотной кислоты. Под действием разбавленной кислоты происходит удаление растворимых гидроокисей, солей и образование прозрачной пленки кремнезема SiO_2 с меньшим, чем у стекла, показателем преломления. Максимальный эффект достигается для «тяжелых» стекол. Так, у стекла ТФ5 коэффициент отражения поверхности снижается с 7,5 до 1,2 %. Образовавшаяся при травлении

пленка кремнезема выполняет также функцию защитного покрытия, предохраняющего поверхность химически нестойких стекол от образования налетов. Процесс используют, в основном, для просветления крупногабаритной оптики или деталей со сложной формой поверхности.

Восстановление серебра из раствора азотнокислого серебра — используют для нанесения отражающих и светоделительных покрытий.

Гидролиз спиртовых растворов эфиров основан на способности тонких слоев растворов этиловых эфиров ортокремниевой и ортотитановой кислот быстро гидролизироваться под действием влажного воздуха нормальной температуры. В результате гидролиза этиловый спирт испаряется, а на поверхности детали осаждается прозрачная пленка двуокиси кремния или титана. Процесс технологически прост, но требует создания стабильных климатических условий в помещении рабочего участка (температура 22 ± 1 °С, относительная влажность 50 ± 5 %).

Пиролиз — образование пленки при воздействии на горячую поверхность подложки газообразных продуктов разложения солей металлов или полупроводниковых соединений при нагревании их до температуры расплавления. Наиболее широко применяется пиролиз для нанесения прозрачных токопроводящих покрытий из двуокиси олова (SnO_2).

Аэрозольный метод — получение прозрачных токопроводящих пленок путем распыления пленкообразующего раствора (хлорное олово, фтористоводородная кислота, этиловый спирт и соляная кислота) на нагретую подложку.

Физические методы предполагают испарение пленкообразующих материалов в вакууме. Осуществляется это, как правило, следующими способами.

Термическое испарение вещества в вакууме — нагрев пленкообразующего вещества в специальной камере до температуры расплавления и испарение его в условиях высокого вакуума. Молекулы вещества, не испытывая сопротивления воздуха и остаточных газов, распространяются прямолинейно и, попадая на поверхность деталей (подложек), конденсируются, образуя пленку. Таким способом могут быть получены все типы оптических покрытий из большого числа веществ (за исключением тугоплавких) с различными свойствами. Процесс высокопроизводителен, возможен контроль толщины в процессе напыления, что позволяет наносить на детали многослойные покрытия с заданными свойствами.

Электронно-лучевое испарение вещества в вакууме — нагрев и испарение пленкообразующего вещества при воздействии на его поверхность сфокусированного мощного пучка ускоренных электронов. С помощью электронно-лучевого испарения возможен локальный нагрев веществ до 5 000 °С, что позволяет испарять тугоплавкие окислы SiO_2 , TiO_2 и др. Пленки получаются чистые и однородные. Испарение осуществляют при высоком вакууме в камере, по конструкции принципиально не отличающейся от установки термического испарения.

Катодное распыление — медленное разрушение поверхности катода под действием ударов ионизированных атомов или молекул газа в условиях тлеющего электрического разряда между электродами в разряженной атмосфере газов. Частицы вещества катода распыляются и осаждаются на подложках, нахо-

дящихся на аноде или вблизи него. Катодным распылением наносят пленки металлов, их окислов, диэлектриков, в том числе тугоплавких веществ. При этом обеспечивается хорошая адгезия пленок с подложками и равномерность нанесения пленок по толщине, а состав пленок почти не отличается от состава вещества катода.

Ефремов В.С., Шлишевский В.Б. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем. – Новосибирск: СГГА, 2013 г. – С. 174 - 199.

Хацевич Т.Н. Медицинские оптические приборы. Часть II. Очковая оптика. – Новосибирск: СГГА, 2012 г. – С. 105 - 116.