

Тонкопленочные интерференционные фильтры в астрофизике

Емельянов Эдуард Владимирович

Содержание

1	Введение	1
2	Методы нанесения тонкопленочных покрытий	3
2.1	Вакуумное испарение	4
2.2	Энергетические процессы	4
2.3	Другие процессы нанесения тонких пленок	5
3	Аппаратура и методы контроля процесса осаждения пленок	5
4	Методы расчета интерференционных фильтров	6
5	Наиболее распространенные материалы для нанесения тонких пленок	8
5.1	Некоторые наиболее часто употребляемые материалы	8
5.1.1	Оксиды кремния	8
5.1.2	Нитрид кремния	8
5.1.3	Оксиды титана	9
5.1.4	Соединения магния	9
5.1.5	Германий	10
5.1.6	Фторид тория	10
5.1.7	Соединения цинка	10
5.1.8	Соединения свинца	11
5.1.9	Соединения алюминия	11
5.2	Материалы для различных спектральных областей	11

1 Введение

Для проведения фотометрических исследований необходимо получать изображения объектов в различных спектральных полосах. Для выделения необходимых полос используются светофильтры. Изначально астрономические светофильтры были только абсорбционными, и их спектральная характеристика оставляла желать лучшего. Однако, многие астрономические задачи требуют фотометрии в узкой спектральной области, например, изучение структуры туманностей в линиях водородной эмиссии. С такой задачей могут справиться лишь интерференционные фильтры.

Промышленное производство оптических интерференционных покрытий начало развиваться только после 1930 г., когда появились хорошие вакуумные насосы и материалы, позволявшие наносить пленки испарением в вакууме. Промышленные установки для получения просветляющих покрытий были разработаны в начале 40-х гг. XX века, и очень скоро преимущества просветляющих покрытий стали очевидны. В начале 60-х гг. XX века начались интенсивные разработки методик нанесения трехслойных и многослойных покрытий. Эксперименты с многослойными четвертьволновыми пленками привели к производству интерференционных зеркал и светофильтров [11]. Единичные экземпляры многослойной интерференционной оптики производились и раньше, например, для исследований в линиях H_α изготавливались тонкопленочные фильтры диаметром до 10 см с полушириной полосы пропускания $70 \div 80 \text{ \AA}$ и пропусканием до 75% [6].

Для исследований Солнца ширина полосы пропускания фильтров должна составлять ангстремы и доли ангстрем. До распространения тонкопленочных технологий такой полосы пропускания добивались посредством последовательной установки нескольких интерферометров Фабри—Перо (ИФП). Расстояния между пластинками интерферометров подбирали так, чтобы в результате общей комбинации получался набор очень узких пиков пропускания. В этом случае точность изготовления поверхностей пластин интерферометров должна быть крайне высокой ($\lambda/60$ и лучше). Для избавления от переотражения света между ИФП все интерферометры, кроме первого, устанавливались с небольшим отклонением от нормали к оптической оси. Выделение нужного интерференционного максимума осуществлялось при помощи дополнительных фильтров. Пропускание таких фильтров было довольно низким, однако, к положительным их качествам можно отнести перестраиваемость центральной длины волны [5].

Разработка технологий внедрения стеклянных «прослоек» между слоями диэлектрика в интерференционном фильтре позволила получить фильтры с очень узкой полосой пропускания. Такой фильтр является как бы комбинацией из нескольких тонкопленочных фильтров. Стеклянные прослойки толщиной в сотни и тысячи длин волн наносятся в процессе изготовления фильтра. Благодаря большой толщине прослоек, интерференция в них практически не возникает. Пропускание таких фильтров достигало $60 \div 70\%$, а полуширина полосы пропускания — 0.5 \AA . Предельный размер фильтров составлял 7.5 см [9].

Основной проблемой в изготовлении тонкопленочных фильтров являются побочные полосы пропускания. Для видимой области эти полосы находятся в УФ- и ИК-диапазонах, однако, в фильтрах для УФ-диапазона обычно наблюдается паразитное пропускание в районе $500 \div 600 \text{ \AA}$ (также наблюдаются полосы в более далеком УФ, однако, они попадают в области поглощения земной атмосферы). Комбинируя различные материалы пленок можно добиться того, что этот «выброс» сдвинется в более далекую ИК-область (тогда от него можно будет избавиться при помощи дополнительного широкополосного УФ-фильтра). Наилучшими показателями обладают фильтры из комбинаций лексана (поликарбонатная смола) и бора; алюминия, титана и бора; титана и сурьмы; индия, монооксида кремния и олова [8].

Обзоры звездного неба в узких фотометрических полосах требуют изготовления фильтров довольно больших размеров (десятки сантиметров в поперечнике). Кроме того, для уменьшения потерь света, желательно чтобы эти фильтры работали в сходящемся световом пучке (т.е. были установлены вблизи фокуса телескопа). Для малых углов отклонения светового пучка от нормали, θ , центральная длина волны фильтра, λ_0 , смещается:

$$\lambda_\theta = \lambda_0 \sqrt{1 - \sin^2 \theta / n_e^2},$$

где n_e — эффективный показатель преломления слоев фильтра. Следовательно, в сходящем-

ся пучке кривая пропускания фильтра будет иметь уширение в синюю область, причем величина этого уширения зависит от угла сходимости светового пучка. Интерференционный фильтр для полосы H_{α} , работающий в сходящемся пучке, успешно использовался на телескопе UKST. Полуширина фильтра составляла 70\AA , апертура фильтра составляла 305 мм . Несмотря на столь внушительные размеры фильтр имел точность передачи волнового фронта не хуже $\lambda/4$ [4]. Более дешевым вариантом интерференционного фильтра с большой апертурой является мозаичный фильтр. Такой фильтр представляет собой своеобразный сэндвич: между двумя стеклянными пластинами вклеиваются прямоугольные интерференционные фильтры небольших размеров. Однако, такие фильтры обладают множеством недостатков [2]:

- сложность контроля параллельности стеклянных пластин—основ при склейке вызывает расфокусировку пучка;
- большая итоговая толщина фильтра вносит в сходящийся пучок света сферическую aberrацию;
- незначительные отклонения положений сегментов фильтра при склейке приводит к эффекту смазывания изображения;
- мозаичный фильтр сильно чувствителен к внешним напряжениям, внутренние напряжения, возникающие при склейке также искажают итоговый волновой фронт.

Двумерная спектрофотометрия основана на получении как минимум двух изображений объекта в разных узких спектральных полосах. Например, для мониторинга содержания какого-либо химического объекта в туманностях необходимо использовать светофильтр с центральной длиной волны, равной длине волны наиболее яркой эмиссионной линии данного элемента, и шириной полосы пропускания как можно более близкой к естественной ширине этой эмиссионной линии. Для извлечения из изображений континуума производится снимок объекта с фильтром, центральная длина волны которого захватывает непрерывный спектр как можно ближе к опорной эмиссионной линии [1]. Данная задача также требует применения качественных интерференционных фильтров с очень узкой полосой пропускания и отсутствием побочных полос пропускания довольно в широком диапазоне длин волн.

2 Методы нанесения тонкопленочных покрытий

При проектировании тонкопленочных покрытий важными являются следующие свойства материалов, из которых эти пленки будут изготовлены: [3]

- оптические свойства (зависимость комплексного показателя преломления от длины волны и область прозрачности материала);
- метод, который будет использоваться для нанесения пленок;
- механические свойства (твердость, хрупкость);
- химические свойства (растворимость, устойчивость к окислению в воздухе, совместимость с другими материалами);
- токсичность;
- стоимость и доступность;
- и некоторые другие специфические свойства, например, электропроводность.

Для нанесения тонкопленочных покрытий существует ряд известных методик. Большинство из них осуществляются в вакууме и заключаются в испарении материала—основы с последующим осаждением пара на материал—подложку. Эти процессы относятся к физическим, в отличие от химических процессов, в которых нанесение пленок производится посред-

ством одной или нескольких стадий химических превращений материала—основы.

Хотя физические процессы нанесения тонких пленок являются наиболее распространенными, использование химических процессов также набирает популярность. Изменение химического состава исходного вещества для получения материала пленки может производиться, например, посредством активации пара плазмой.

2.1 Вакуумное испарение

В процессах вакуумного испарения пар получают посредством нагрева материала—основы. Молекулы пара движутся в вакууме практически по линейным траекториям, поэтому толщина осажденной пленки зависит только от положения подложки по отношению к испарителю. Свойства осажденной пленки в основном не отличаются от свойств исходного материала, однако, в микроструктуре пленки могут возникнуть некоторые отличия.

Испаритель обычно представляет собой металлический тигель из тантала или молибдена (в более редких случаях — из вольфрама), в который засыпается порошкообразный материал—основа. Испарение осуществляется за счет разогрева тигля посредством электрического тока. Некоторые тугоплавкие материалы испаряются из кремниевых тиглей посредством разогрева вольфрамовой спиралью, размещенной над тиглем или внутри него. Еще одним способом испарения исходного материала является электронная бомбардировка. При этом температура испарения материала значительно снижается, а благодаря возможности управления электронным пучком при помощи электрического и магнитного полей достигается более равномерное осаждение материала на подложку.

В процессе осаждения тонких пленок для получения однородной качественной пленки важным условием является постоянство температуры подложки. Для этого подложки нагреваются излучателями или вольфрамовыми спиралями, контроль постоянства температуры осуществляется при помощи термопар или иных видов тепловых датчиков, размещенных либо непосредственно на подложках, либо вблизи от них. Температура подложки зависит от осаждаемого на нее вещества: некоторые вещества лучше осаждаются при комнатных температурах, для некоторых же требуется разогреть подложку до $200 \div 300^\circ\text{C}$.

2.2 Энергетические процессы

К энергетическим относятся процессы, в которых молекулы испаренного вещества дополнительно ускоряются тем или иным способом по пути к подложке. За счет такого ускорения структура осажденной пленки является более плотной и близкой по характеристикам к исходному веществу, чем в методах вакуумного испарения.

К классическим энергетическим процессам можно отнести бомбардирование осаждаемого материала ионными пучками. Кинетическая энергия ионов передается молекулам испаренного вещества, в результате чего при осаждении этих молекул на подложку создается плотная структура без полостей или неоднородностей кристаллической решетки. Бомбардировка ионными пучками осуществляется при помощи линейного магнетрона. Достоинством этого метода является возможность получения пленок из оксидов или других соединений, вводя в ионный поток инертного газа необходимые примеси. Основным недостатком является возможность повреждения подложки или предыдущих слоев, т.к. высокоэнергетичные молекулы осаждаемого материала могут проникнуть вглубь уже осажденной структуры. Эту проблему можно решить при помощи двух мишеней, подключенных к источнику переменного электрического поля. В результате каждая мишень поочередно становится то анодом,

то катодом, и на поверхности подложки не образуются связанные заряды, вызывающие ее повреждение или нарушающие скорость осаждения вещества.

2.3 Другие процессы нанесения тонких пленок

Для получения оксидных пленок из металлической основы можно использовать метод чередования нанесения на подложку металла и бомбардирования ее ионным пучком. Для этого подложки устанавливаются на вращающийся барабан. Регулируя скорость вращения барабана и интенсивности ионного потока и потока молекул основы пленки можно добиваться различных степеней окисления результирующего покрытия и качественного его уплотнения. Еще один процесс, позволяющий получать качественные оксидные пленки, называется микроплазменным. Его суть в том, что магнетронный источник помещается в поток аргона, играющего роль ионного барьера. Вне аргонного барьера уже нанесенные пленки окисляются в ионном пучке. Недостатком второго метода является значительный приток газа в вакуумную камеру, и для его реализации необходимо обеспечить постоянное откачивание излишков газа вакуумным насосом.

Для нанесения органических пленок может использоваться процесс, который называют плазменной полимеризацией. В этом процессе пучок электронов выбивает из материала—основы активные фрагменты, которые полимеризуются на подложке. При этом между оседающими на подложку фрагментами возникают сильные связи, благодаря которым пленка получается плотной. В зависимости от интенсивности электронного пучка осаждающаяся пленка может содержать свободные радикалы, которые возможно окислять посредством ионного кислородного источника. Варьируя концентрацию оксидов в осаждающейся пленке можно изменять ее механические свойства от эластичности до стеклообразности.

3 Аппаратура и методы контроля процесса осаждения пленок

Для измерения плотности потока испаряемого вещества известны два метода [12]. Первый основан на ионизации молекул пара электронным пучком и регистрации ионного тока. Вторым методом основан на измерении динамической силы, с которой сталкивающиеся с поверхностью молекулы воздействуют на нее. С практической точки зрения первый метод имеет более простую реализацию и позволяет с достаточной точностью контролировать плотность потока молекул вещества—основы пленки.

Для косвенного контроля толщины осажденной пленки можно использовать датчики, измеряющие массу осажденного вещества. К этим датчикам относятся:

- Микровесы. Принцип их действия может сильно различаться, однако, наибольшее распространение получили микровесы на основе микроамперметра, собранного по мостовой схеме. Также распространены электромагнитные крутильные весы.
- Кристаллические резонаторы. Эти датчики основаны на зависимости резонансной частоты кварцевой пластины от ее толщины (а, следовательно, и массы осажденного вещества). Для выделения малых изменений основной резонансной частоты обычно используют второй (эталонный) генератор. Сигналы от обоих генераторов смешивают и измеряют уже частоту биений. Однако, при использовании таких приборов следует учитывать зависимость резонансной частоты кварцевой пластины и от других параметров, например, ее температуры.

В некоторых случаях параметры осаждаемой пленки необходимо измерять непосредственно в процессе осаждения. В этом случае можно воспользоваться следующими видами датчиков:

- Оптические датчики. Данный вид датчиков основан на явлении интерференции в тонких пленках. Недостатком данного метода является сложность измерения толщин пленок, меньших длины волны опорного излучения. Однако, он удобен при изготовлении интерференционных светофильтров, когда толщины диэлектрических слоев пропорциональны $\lambda/4$.
- Резисторные датчики применимы для контроля толщин металлических пленок. Принцип действия этих датчиков основан на зависимости сопротивления пленки от ее толщины. К недостаткам данного метода стоит отнести то, что при малых толщинах металлической пленки наблюдается зависимость ее сопротивления от приложенного электрического поля. Резисторный датчик обычно включается по мостовой схеме или в качестве входного сопротивления усилителя обратной связи. Общим недостатком всех резисторных датчиков является опасность разрушения пленки токовой перегрузки в начальной стадии осаждения.
- Емкостные датчики. Данный тип датчиков относится скорее к измерителям массы осажденного вещества или плотности потока испаряемого вещества. В нем используется зависимость емкости конденсатора от диэлектрической проницаемости вещества, находящегося между пластинами. Если использовать планарный конденсатор, на который будет осаждаться диэлектрическая пленка, на основании изменения емкости конденсатора можно судить о массе осажденного вещества (однако, точность такого метода невысока и сильно падает для тонких пленок). Если же пластины конденсатора разместить так, чтобы между ними проходил поток испаряемого вещества, по изменению емкости конденсатора можно судить о скорости осаждения. В данном случае чувствительность измерения также невысока и не превосходит чувствительности ионизационных датчиков.

Для напыления тонкопленочных покрытий, в наибольшей степени отвечающих заданным характеристикам, можно комбинировать контроль параметров уже нанесенных пленок и вычисление толщин следующих слоев в соответствии с характеристикой имеющегося покрытия. В этом случае контроль толщин пленок осуществляется при помощи кварцевых резонаторов, а оптические характеристики покрытия — посредством оптического мониторинга (например, эллипсометрического). Изготовленные по этой технологии покрытия дают очень малую расхожимость с теоретическими характеристиками [7].

4 Методы расчета интерференционных фильтров

Численный расчет многослойных систем с заданными спектральными характеристиками является обратной задачей. Данная задача, строго говоря, является некорректной и быстро усложняется при увеличении количества слоев покрытия.

Оценить полуширину полосы пропускания интерференционного фильтра, состоящего из чередующихся слоев с низким, n_L , и высоким, n_H , показателем преломления, можно по формуле [10]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}.$$

Очевидно, что для получения узкополосных фильтров необходимо подобрать материалы сло-

ев с близкими показателями преломления, а для получения фильтра, пропускающего довольно широкий спектральный интервал, показатели преломления соседних слоев должны различаться как можно больше.

Для оценки оптической плотности, A , многослойного покрытия и ее изменения, ΔA при добавлении новой пары слоев, можно воспользоваться приближенными формулами

$$A \approx 2 \lg \left[\frac{1}{2} \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^p + \frac{1}{2} \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^p \right], \quad \Delta A \approx 2 \lg \left(\frac{n_H}{n_L} \right),$$

где p —количество пар слоев покрытия. Кроме того, оптическая плотность покрытия зависит от порядка следования слоев: наибольшее значение A принимает в случае, когда покрытие начинается и заканчивается слоем с большим показателем преломления. По приведенным формулам можно оценить количество слоев фильтра, исходя из заданных характеристик.

Для определения степени близости характеристик расчетного покрытия к требуемым удобно использовать функционал вида

$$F(n) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I(\lambda) - \tilde{I}(\lambda)]^2 \rho(\lambda) d\lambda,$$

где $n = n(z)$ – искомая функция, описывающая профиль показателя преломления по толщине покрытия, $I(\lambda)$ и $\tilde{I}(\lambda)$ – полученная и требуемая спектральная характеристика фильтра, $\rho(\lambda)$ – весовая функция, определяющая «ценность» того или иного участка характеристики. Численная задача оптимизации сводится к замене интегральной суммы на сумму ряда с конечным количеством членов и поиску минимума полученного функционала.

Так как функцию распределения толщин слоев тонкопленочных покрытий можно представить в виде зависимости комплексного показателя преломления от координаты, задача синтеза модели интерференционного покрытия сводится к поиску первой и второй вариации профиля показателя преломления. Частным случаем этой вариационной задачи является игольчатый синтез, представляющий собой вариации профиля показателя преломления конечной высоты и малой ширины. С физической точки зрения такая вариация соответствует введению в покрытие нового слоя с известным показателем преломления и бесконечно малой толщиной. Важнейшим свойством метода игольчатого синтеза является то, что он не нуждается в специальном выборе хороших начальных приближений. Удачное начальное приближение может лишь ускорить сходимость метода [14].

Теоретические результаты, полученные при помощи метода игольчатых вариаций зачастую бывают трудно реализуемы на практике ввиду сложности изготовления покрытий с толщинами порядка 10Å и контроля толщины каждого слоя вплоть до десятков ангстрем. Большую практическую значимость имеет модификация метода игольчатых вариаций — метод последовательной эволюции. Его суть состоит в принудительном увеличении толщин слоев, полученных при помощи метода игольчатых вариаций с последующей оптимизацией под заданную спектральную характеристику. Данный метод имеет рекуррентный характер, критерием окончания вычислений являются заранее заданные пределы физических толщин слоев. В результате вычислений при помощи метода последовательной эволюции получается серия возможных решений, из которых оператор может выбрать то, которое в наибольшей степени соответствует возможностям находящейся в его распоряжении напылительной и измерительной аппаратуры [13].

5 Наиболее распространенные материалы для нанесения тонких пленок

Для нанесения любых многослойных интерференционных покрытий выгодно (с точки зрения как проектирования, так и изготовления покрытий), чтобы показатели преломления соседних пленок как можно сильнее различались.

В видимом и близком ИК—диапазонах наибольшим и наименьшим показателями преломления обладают, соответственно, оксид титана, TiO_2 ($n_{550} \approx 2.35$), и фторид магния, MgF_2 ($n_{550} \approx 1.38$). Однако, с точки зрения удобства нанесения чаще в качестве покрытия с низким показателем преломления используют кварц, SiO_2 ($n_{550} \approx 1.46$) [10].

В ИК—диапазоне от 8 до 12 мкм наилучшие свойства показывают германий, Ge ($n \approx 4.1$), и фторид тория, ThF_4 ($n \approx 1.35$). Недостатком последнего является радиоактивность, поэтому обычно его стараются заменить каким-либо другим материалом. В этой области зачастую выбор материалов основан на их физических свойствах и удобстве напыления, нежели на показателе преломления.

5.1 Некоторые наиболее часто употребляемые материалы

5.1.1 Оксиды кремния

Кварц, или диоксид кремния, SiO_2 , — один из самых распространенных материалов с низким показателем преломления. Помимо удобства нанесения и хороших механических качеств этот материал обладает устойчивостью к воздействию мощных потоков излучения, например, от лазеров. Наименьшее значение показателя преломления кварца, 1.38, достигается на длине волны 248 нм.

При распылении на мишень непосредственно кварца получается неоднородное покрытие. Для достижения равномерного напыления кварцевой пленки можно воспользоваться одним из следующих методов. Первый метод заключается в распылении расплавленного кремния с последующим окислением его посредством бомбардирования ионами кислорода. Данный метод сложен тем, что необходимо очень точно определить условия напыления (особенно относительное содержание паров кремния и ионов кислорода, чтобы не допустить недо- или переокисления) и постоянно их контролировать. Другой метод заключается в распылении монооксида кремния, SiO , с последующим окислением.

Для изготовления покрытий, работающих в ИК—диапазоне зачастую в качестве материала с низким показателем преломления ограничиваются монооксидом кремния ($n \approx 1.9$), а в качестве материала с высоким показателем преломления выбирают кремний. Такие покрытия наиболее просты в нанесении.

5.1.2 Нитрид кремния

В последнее время в технологиях оптических покрытий часто стали применять нитрид кремния, Si_3N_4 . Пленки из этого материала прочны (по прочности не уступают сапфиру, Al_2O_3) и устойчивы к коррозии. Кроме того, характеристики многослойных покрытий с Si_3N_4 устойчивы при изменении окружающей температуры или влажности. Показатель преломления нитрида кремния на длине волны 400 нм $n_{400} \approx 2.1$. Рабочий спектральный диапазон пленок из нитрида кремния простирается от ~ 260 нм до ~ 7 мкм, вне этого диапазона поглощение Si_3N_4 резко возрастает.

5.1.3 Оксиды титана

Диоксид титана, TiO_2 является наиболее распространенным материалом с высоким показателем преломления в области видимого и ИК—излучения. Однако, при нанесении пленок из диоксида титана показатель преломления первой пленки будет ниже ($n_{550} = 2.06$), чем у последующих ($n_{550} \approx 2.20$). В наибольшей степени от количества напылений зависит показатель преломления монооксида титана, TiO : при первом нанесении $n_{550} \approx 2.38$, при последующих нанесениях показатель преломления начинает убывать, асимптотически устремляясь к $n = 2.20$. Самым устойчивым значением показателя преломления обладает оксид титана Ti_3O_5 , у него $n_{550} = 2.205$ и не зависит от количества напылений. Скорее всего, это связано со сложностью реализации равномерного окисления титановых пленок во время их нанесения. Современные методики вакуумного напыления позволяют добиться более стабильного поведения характеристик напыляемых слоев.

Интересны фотокаталитические свойства диоксида титана. Под воздействием УФ—излучения пленки из этого вещества способны отторгать находящиеся на их поверхности инородные примеси. Таким образом, светофильтры, защищенные пленкой из диоксида титана, легче очищать от загрязнений.

К недостаткам пленок из диоксида титана следует отнести зависимость показателя преломления от внешней температуры и давления.

5.1.4 Соединения магния

Фторид магния, MgF_2 ($n = 1.32 \div 1.39$) успешно используется уже более пятидесяти лет в качестве компонента четвертьволновых просветляющих покрытий. Его диапазон пропускания составляет от 120 нм и до 7 мкм. Благодаря хорошей механической стойкости тонкие пленки MgF_2 используются и в качестве защитного покрытия фильтров, вплоть до $\lambda = 12$ мкм.

Качество покрытия фторидом магния имеет сильную зависимость от температуры подложки. Наибольшую плотность упаковки и твердость имеет покрытие, нанесенное на разогретую до 300°C подложку. Плотность упаковки и показатель преломления пленок из MgF_2 имеют практически линейную зависимость от температуры подложки в интервале $0 \div 300^\circ\text{C}$.

Фторид магния обычно испаряется из электрически разогреваемого молибденового или танталового тигля. Осаждение MgF_2 при помощи пучка электронов проблематично, т.к. зачастую приводит к диффузии материала в подлежащие слои. Это вызывается взрывообразным испарением гранул материала в тигле, сопровождающимся разбрызгиванием капель. Замечено также, что при облучении подложки во время напыления ионами кислорода (а не классического для этих случаев аргона) покрытие из MgF_2 получается более плотным и устойчивым.

Магнезия, MgO , является покрытием с высокими механическими показателями и хорошо пропускает излучение от УФ— до ИК—диапазона (от 190 нм до 9 мкм). Причем в сторону уменьшения длин волн показатель преломления магнезии увеличивается: $n_{250} \approx 1.86$, $n_{166} \approx 2.65$ (однако, увеличивается и поглощение: $k_{166} \approx 0.1$).

Из комбинации магнезии и фторида магния могут изготавливаться качественные оптические покрытия для УФ—диапазона, однако, количество слоев такого покрытия ограничено примерно шестьюдесятью из-за внутренних напряжений в слоях. Из-за взаимодействия MgO с атмосферным углекислым газом покрытия мутнеют и изменяют свои свойства, поэтому магнезию нельзя использовать в качестве последнего слоя оптических покрытий.

5.1.5 Германий

Германий наиболее распространен как покрытие с высоким показателем преломления ($n \geq 4$) в ИК—диапазоне ($2 \div 14$ мкм). Этот материал имеет высокую стойкость к внешним воздействиям и хорошо проявляет себя при осаждении. Обычно его испаряют в вольфрамовых или графитовых тиглях, однако, для нанесения германия можно использовать и испарение пучком электронов. Покрытия наилучшего качества получают, дополнительно облучая мишень пучком ионов. Германий может принимать как кристаллическую, так и аморфную структуру. Аморфный германий имеет более высокое поглощение, чем кристаллический, поэтому важным фактором является правильный выбор температуры подложки. Переход германия в кристаллическую форму происходит при температуре подложки порядка 200°C . При температурах выше 240°C германий при осаждении принимает аморфную структуру.

5.1.6 Фторид тория

Фторид тория, ThF_4 является одним из наилучших материалов с низким показателем преломления в области $0.26 \div 12$ мкм. Основным его недостатком является радиоактивность. Показатель преломления ThF_4 изменяется от 1.60 для УФ—границы до 1.38 для ИК—границы. Несмотря на радиоактивность, в ИК—диапазоне фторид тория является наилучшим покрытием с низким показателем преломления.

Фторид тория испаряется из молибденовых или танталовых тиглей аналогично фториду магния. Для использования данного материала необходимо быть предельно осторожным с его порошкообразной формой и парами, т.к. они представляют собой опасность в случае попадания в легкие. При непосредственном контакте с этим веществом возможность радиоактивного облучения крайне низка.

5.1.7 Соединения цинка

Сульфид цинка, ZnS , является материалом с высоким показателем преломления ($n \approx 2.35$) в довольно широком спектральном диапазоне: $0.4 \div 13$ мкм. Он обладает хорошими механическими свойствами и может наноситься из резистивных источников. Однако, сульфид цинка недостаточно чист, из-за чего осложняется его нанесение при повышенных температурах (с ростом температуры эффективность осаждения ZnS резко снижается). Наиболее эффективно осаждение пленок из сульфида цинка происходит при температуре подложки $\sim 40^\circ\text{C}$. Еще одним недостатком этого вещества является чувствительность к УФ—излучению: под воздействием УФ в воздухе сульфид цинка преобразуется в оксид, поэтому пленки из данного вещества необходимо покрывать защитным покрытием.

Особенностью пленок из сульфида цинка является изменение показателя преломления в процессе роста пленки: в процессе роста пленки показатель преломления постепенно возрастает, достигая стабильного значения при толщине пленки более 300 нм.

Из-за химической активности сульфида цинка в случае, когда пленки из этого вещества необходимо чередовать с пленками, наносимыми при высоких температурах, необходимо пользоваться различными вакуумными камерами. При высоких температурах ZnS может сублимировать со стенок камеры и смешиваться с парами других веществ.

Таким образом, недостатки сульфида цинка ограничивают области его применения однослойными покрытиями с защитным слоем, или же многослойными покрытиями в комбинации с веществами, имеющими близкие параметры процесса осаждения.

Селенид цинка, ZnSe, обладает схожими с сульфидом цинка характеристиками. Его показатель преломления несколько выше ($n_{500} \approx 2.6$), а показатель поглощения ниже, вплоть до $\lambda = 14$ нм. Его осаждение может успешно производиться при температуре до 250°C .

Оксид цинка, ZnO, наиболее часто используется для отсекающего УФ—излучения из-за высокого показателя поглощения в области $\lambda < 400$ нм. Это свойство позволяет использовать пленки ZnO для защиты поверхностей, чувствительных к УФ—излучению.

5.1.8 Соединения свинца

Теллурид свинца, PbTe, является одним из материалов с наивысшим показателем преломления в ИК—диапазоне ($n_{4000} \approx 6$, $k \approx 0.1$ в диапазоне $3.8 \div 25$ нм). Тонкие пленки PbTe прозрачны вплоть до $\lambda = 40$ нм.

Напыление теллурида свинца производится из танталовых или молибденовых тиглей. Подобно соединениям цинка, PbTe следует наносить на не очень горячую ($\sim 250^\circ\text{C}$) подложку. При работе с этим материалом необходимо использовать средства индивидуальной защиты.

Фторид свинца, PbF₂, используется как материал с высоким показателем преломления ($n_{300} = 1.998$) в УФ—диапазоне. Кроме того, этот материал является одним из наименее поглощающих ИК—излучение до $\lambda = 12$ мкм (в диапазоне $8 \div 12$ нм $n \approx 1.3$, $k = 0.1 \div 0.3$). При напылении показатель преломления PbF₂ может уменьшиться в случае контакта со стенками танталовых, молибденовых или вольфрамовых тиглей, поэтому фторид свинца необходимо распылять из платиновых или керамических тиглей.

5.1.9 Соединения алюминия

Корунд, Al₂O₃ обычно используется как материал со средним показателем преломления ($n \approx 1.6$). Этот материал достаточно прозрачен в диапазоне $0.2 \div 10$ мкм. Его оптические характеристики в достаточной мере стабильны, а механическая стойкость позволяет использовать в качестве защитных покрытий. Корунд напыляется посредством электронных пучков. Для уплотнения структуры пленки возможно добавление в вакуумную камеру кислорода.

Нитрид алюминия, AlN, прозрачен в диапазоне $275 \div 800$ нм, $n_{633} = 2.10$. Напыление покрытий из нитрида алюминия производится путем испарения чистого алюминия и облучения его ионами азота и электронным пучком. Оптические и механические свойства этого покрытия хорошо подходят для использования его в качестве защитного.

Фторид алюминия, AlF₃, прозрачен от 195 нм до 10 мкм, $n_{248} = 1.36$, $n_{3000} \approx 1.3$. Вплоть до $\lambda = 1$ нм фторид алюминия обладает нулевым поглощением. Этот материал имеет хорошую механическую стойкость, однако сильно чувствителен к влажности.

5.2 Материалы для различных спектральных областей

В таблицах 1—3 рассмотрены некоторые материалы, наиболее часто применяющиеся в технологии тонких пленок. Здесь использованы следующие обозначения: $\langle n \rangle$ — средний (или характерный) показатель преломления в данном диапазоне длин волн, λ — диапазон прозрачности материала, n_H , n_M и n_L — материалы с высоким, средним и низким показателем преломления, соответственно.

Таблица 1: Ультрафиолетовый диапазон

n_H			n_M			n_L		
материал	$\langle n \rangle$	λ	материал	$\langle n \rangle$	λ	материал	$\langle n \rangle$	λ
BeO	1.8	> 190	SiO ₂	1.5	> 200	CaF ₂	1.2	> 150
AlN	2	> 275	ThF ₄	1.5	> 250	NaF	1.3	> 250
Si ₃ N ₄	2	> 320	Si ₂ O ₃	1.5	> 300	AlF ₃	1.36	> 195
HfO ₂	2.1	> 220	GdF ₃	1.6	> 140	LiF	1.4	> 110
ZrO ₂	2.1	> 340	LaF ₃	1.6	> 200	MgF ₂	1.4	> 210
Sb ₂ O ₃	2.2	> 300	Al ₂ O ₃	1.6	> 200			
TiO ₂	2.2 ÷ 2.7	> 350	NdF ₃	1.6	> 220			
PbCl ₂	2.3	> 300	CeF ₃	1.6	> 300			
			MgO	1.7	> 210			
			PbF ₂	1.8	> 240			
			ThO ₂	1.8	> 250			

Таблица 2: Видимый диапазон

n_H			n_M			n_L	
материал	$\langle n \rangle$	λ	материал	$\langle n \rangle$	λ	материал	$\langle n \rangle$
La ₂ O ₃	1.95		SiO ₂	1.46		AlF ₃	1.3
AlN	2		SrF ₂	1.46	> 600	NaF	1.34
HfO ₂	2.00		Si ₂ O ₃	1.5		LiF	1.36
Nd ₂ O ₃	2.0	> 400	ThF ₄	1.5		MgF ₂	1.38
Sb ₂ O ₃	2		GdF ₃	1.55		CaF ₂	1.4
SiO	2.0	> 500	HfF ₄	1.57	> 600		
Si ₃ N ₄	2.06		LaF ₃	1.59			
ZrO ₂	2.1		Al ₂ O ₃	1.6			
Ta ₂ O ₅	2.16		CeF ₃	1.6			
CeO ₂	2.2	> 400	NdF ₃	1.60			
TiO ₂	2.2 ÷ 2.7		BeO	1.7			
Cr ₂ O ₃	2.24	> 600	BiF ₃	1.7			
PbCl ₂	2.3		MgO	1.7			
ZnS	2.35		PbF ₂	1.75			
Bi ₂ O ₃	2.5	> 500	ThO ₂	1.8			
ZnSe	2.58	> 600					
CdS	2.6	> 600					
TiCl	2.6						
Sb ₂ S ₃	3.0						

Таблица 3: Инфракрасный диапазон

n_H			n_M			n_L		
материал	$\langle n \rangle$	λ	материал	$\langle n \rangle$	λ	материал	$\langle n \rangle$	λ
La ₂ O ₃	1.86	< 2	GdF ₃	1.5	< 12	AlF ₃	1.3	< 10
HfO ₂	1.9	< 12	HfF ₄	1.5	< 12	CaF ₂	1.3	< 12
Nd ₂ O ₃	1.95	< 2	LaF ₃	1.5	< 12	LiF	1.3	< 7
Ta ₂ O ₅	1.95	< 10	Si ₂ O ₃	1.5	< 8	NaF	1.3	< 14
PbCl ₂	2	< 14	SiO ₂	1.5	< 8	SrF ₂	1.3	< 12
Sb ₂ O ₃	2	< 1	ThF ₄	1.5	< 15	MgF ₂	1.35	< 10
Si ₃ N ₄	2	< 7	Al ₂ O ₃	1.6	< 10			
ZrO ₂	2	< 12	CeF ₃	1.6	< 12			
Cr ₂ O ₃	2.1	< 8	NdF ₃	1.6	< 12			
Bi ₂ O ₃	2.2	< 12	BeO	1.7	?			
CeO ₂	2.2	< 16	BiF ₃	1.7	< 20			
TiO ₂	2.2 ÷ 2.7	< 12	MgO	1.7	< 8			
ZnS	2.2	< 25	PbF ₂	1.7 ÷ 1.3	< 20			
CdS	2.3	< 7	SiO	1.7	< 8			
ZnSe	2.5	< 15	ThO ₂	1.8	< 15			
TiCl	2.6	< 20						
CdTe	3	?						
Sb ₂ S ₃	3	< 10						
Si	3.5	1.1 ÷ 14						
Ge	4.25	1.7 ÷ 100						
Te	4.9	3.4 ÷ 20						
PbTe	5.5	3.4 ÷ 30						

Список литературы

- [1] *Dutil Y., Roy J.-R.* The Hazards of Imaging Spectrophotometry with Interference Filters // *Astron. J.* — 2001. — Vol. 122. — Pp. 1644–1655.
- [2] *Elliott K. H., Meaburn J.* The design, construction and performance of a large H alpha and /N II/ interference filter for the SRC 48-inch Schmidt // *Astrophys. Space Sci.* — 1976. — Vol. 39. — Pp. 437–445.
- [3] *MacLeod H. A., Welford W. T.* Thin-Film Optical Filters / Ed. by W. T. Welford. — third edition. — 2001. — 641 pp.
- [4] *Parker Q. A., Bland-Hawthorn J.* Technical aspects of the new AAO/UKST H-alpha interference filter // *Publications of the Astronomical Society of Australia.* — 1998. — Vol. 15. — Pp. 33–37.
- [5] *Ramsay J. V.* Very narrow band interference filters // *Proceedings of the Astronomical Society of Australia.* — 1967. — Vol. 1. — Pp. 66–67.
- [6] *Ring J.* Dielectric interference filters in astronomical photography // *The Observatory.* — 1955. — Vol. 75. — Pp. 249–252.
- [7] *In situ* optical characterization and reengineering of interference coatings / S. Wilbrandt, O. Stenzel, N. Kaiser et al. // *Applied Optics.* — 2008. — Vol. 47, no. 13. — Pp. 49–54.
- [8] Thin Film Filters to be used on the Extreme Ultraviolet Explorer Satellite / J. V. Vallerga, O. H. W. Siegmund, P. Jelinsky, R. F. Malina // *Bulletin of the American Astronomical Society.* — Vol. 19 of *Bulletin of the American Astronomical Society.* — 1987. — P. 690.
- [9] *Title A. M.* A new kind of interference filter. // *Bulletin of the American Astronomical Society.* — Vol. 3 of *Bulletin of the American Astronomical Society.* — 1971. — P. 264.
- [10] *Willey R. R.* Practical design and production of optical thin films / Ed. by R. R. Willey. — 2002.
- [11] Оптические интерференционные покрытия // *Успехи физических наук.* — 1973. — Т. 110, № 2. — С. 293–307.
- [12] Технология тонких пленок (справочник). Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Нью-Йорк, 1970: Пер. с англ. / Под ред. М. И. Элинсон, Г. Г. Смолко. — М., «Сов. радио», 1977. — Т. 1. — 664 с.
- [13] *Тихонравов А. В., Трубецков М. К.* Современное состояние и перспективы развития методов проектирования многослойных оптических покрытий // *Оптический журнал.* — 2007. — Т. 74, № 12. — С. 66–73.
- [14] *Трубецков, М. К.* Обратные задачи синтеза и распознавания в оптике многослойных покрытий: Дисс. . . д-ра физ.-мат. наук: 01.04.05. — М., 2001. — 337 с.