

Э. С. Путилин, Л. А. Губанова

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОПТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Рассмотрены основные проблемы конструирования и изготовления многослойных систем, предназначенных для формирования энергетических характеристик оптических элементов и волнового фронта прошедшего и отраженного излучения.

Ключевые слова: оптические покрытия, просветляющие покрытия, светораспределительные, зеркальные, полярирующие, градиентные слои.

Использование оптических приборов и методов исследования в различных областях науки и техники приводит к необходимости создания многослойных диэлектрических, металлодиэлектрических систем, удовлетворяющих различным требованиям к их свойствам и возможному их сочетанию. Это, в первую очередь, оптические, физико-механические, химические и другие свойства. Оптические свойства определяются спектральными зависимостями энергетических или амплитудных коэффициентов пропускания (отражения). Амплитудные и энергетические коэффициенты пропускания (отражения) являются функцией показателя преломления, оптической толщины и порядка расположения слоев на поверхности оптического элемента. В зависимости от сочетания этих параметров могут быть получены зеркальные, просветляющие, фильтрующие, свето- и спектроделительные, градиентные и фазово-компенсирующие покрытия.

На современном этапе развития фотоники, оптоинформатики, оплотехники, лазерной оптики требования к оптическим свойствам покрытий существенно расширяются. Следует упомянуть часто противоречивые требования: во-первых, непрерывно увеличивающийся спектральный диапазон (несколько сотен нанометров) работы приборов, во-вторых, существенное сужение спектрального диапазона (несколько десятых нанометра), в-третьих, возможность работы в нескольких спектральных диапазонах. Помимо этого ужесточаются требования к лучевой, механической, химической стойкости и прочности покрытий. Отдельной проблемой является необходимость сочетания способности формировать не только спектральные характеристики, но и форму волнового фронта отраженного (прошедшего) излучения. Многослойные покрытия, нанесенные на преломляющие и отражающие грани оптических элементов, позволяют формировать не только спектральные зависимости с заданным распределением энергетических коэффициентов пропускания и отражения, но и форму

волнового фронта отраженного или прошедшего излучения. Это может быть обеспечено благодаря уникальным свойствам тонкопленочных систем. Незначительная масса и относительная простота их реализации позволяют широко применять интерференционные покрытия. В некоторых случаях оптические элементы с нанесенными на них покрытиями работают в сходящихся или расходящихся пучках. Оптические свойства многослойных диэлектрических систем в значительной степени зависят от угла падения излучения на них. При увеличении угла падения спектральные зависимости смещаются в коротковолновую область и деформируются. Степень деформации спектральных кривых зависит от поляризации падающего излучения [1]. При изменении толщины слоев, формирующих диэлектрические системы, происходят аналогичные изменения. Поскольку энергетические характеристики покрытий зависят от угла падения на них излучения, то ужесточаются требования к поляризационным свойствам оптических покрытий. Отдельную задачу представляет собой осаждение покрытий на нестойкие стекла, кристаллы и полимеры. В настоящее время выделяют следующие большие группы покрытий.

Просветляющие покрытия. Основная, почти классическая, задача просветляющих покрытий — увеличение рабочего спектрального диапазона и уменьшение остаточного отражения в зоне прозрачности подложки (20—100 нм, интегральный коэффициент отражения не более 0,5 %) [2]. Для деталей, работающих в различных приборах, необходимо обеспечить минимальное отражение, часто близкое к нулю на одной, двух длинах волн или в их интервале. Для одной длины волны эта задача реализуется в большинстве случаев. В двух длинах волн структура покрытия определяется как расстоянием между рабочими длинами волн, так и показателем преломления материала, из которого изготовлена оптическая деталь. Уменьшение коэффициента отражения в заданном интервале длин волн в первую очередь определяется его шириной, т.е. величиной отношения длинноволновой границы к коротковолновой 1:2, 1:3, 1:4 и т.д. При создании покрытий, работающих в широком спектральном диапазоне, включающем ультрафиолетовую, видимую и ближнюю инфракрасную части спектра, решение задачи увеличения диапазона осложняется тем, что оно существенно зависит не только от показателя преломления просветляемого материала, но и его зоны прозрачности последнего.

Количество стабильных, химически устойчивых, стойких к воздействию внешней атмосферы пленкообразующих материалов невелико. Основную сложность вызывает отсутствие прозрачных в широкой спектральной области пленкообразующих материалов с большим показателем преломления. Наибольшие сложности возникают при создании антиотражающих покрытий на оптических материалах с малым показателем преломления и прозрачных в ультрафиолетовой части спектра. Однако при использовании современных методов синтеза оптических покрытий (определение числа, порядка расположения, оптической толщины и показателей преломления слоев) удается создавать конструкции, обеспечивающие заданные требования [3, 4]. Такие конструкции содержат слои, толщина которых не превышает нескольких нанометров, что вызывает значительные технологические сложности, связанные как с контролем толщины слоев в процессе их изготовления, так и со стабильностью параметров пленок во времени. Это требует создания новых методов контроля толщины слоев в процессе осаждения и исследования изменения свойств этих слоев в процессе эксплуатации [5—8].

Не меньший интерес в последнее время вызывают покрытия, работающие в области вакуумного ультрафиолета [8]. Создание таких покрытий в настоящее время сдерживается из-за отсутствия знаний о показателях преломления пленкообразующих материалов, прозрачных в этой области спектра, и приборов, позволяющих характеризовать эти материалы с приемлемой точностью.

Особый интерес в последние годы проявляется к просветляющим покрытиям с переменным по толщине показателем преломления. Хотя свойства таких покрытий известны

очень давно, их экспериментальная реализация в промышленных условиях к настоящему времени почти отсутствует [9, 10].

Свето- и спектрорделительные покрытия. При разработке и создании спектрорделительных покрытий, особенно применяемых в оптоэлектронике и оптической связи, основная проблема заключается в уменьшении рабочего спектрального диапазона и зоны, в которой коэффициент отражения или пропускания меняется быстро (крутизна спектральной характеристики, определяемая как $dT/d\lambda$ или $dR/d\lambda$, должна иметь максимальное значение в этом диапазоне). Зоны прозрачности (шириной до нескольких десятых нанометра), подавления (до нескольких десятков нанометров) и контрастность, определяемая как отношение максимального и минимального пропускания, должны иметь фиксированное значение, определяемое эксплуатационным назначением [2].

Основная сложность, возникающая при создании таких покрытий, заключается в необходимости обеспечения минимального значения полуширины и максимального значения $dT/d\lambda$ ($dR/d\lambda$) [11]. Классический путь ее преодоления — использование систем, состоящих из большого числа четвертьволновых слоев с малой разницей в показателях преломления пленкообразующих материалов. Однако при этом зона максимального отражения уменьшается пропорционально разнице в показателях преломления. Аналогичный результат может быть достигнут при использовании материалов с большой разницей показателей преломления пленкообразующих материалов при меньшем числе слоев, что не всегда возможно в ультрафиолетовой и видимой областях спектра из-за отсутствия таких материалов. При решении этой задачи необходимо искать компромиссный вариант, позволяющий в случае разумного количества слоев достичь заданных свойств покрытия. Этот компромисс определяется свойствами пленкообразующих материалов (собственные напряжения и коэффициент термического расширения пленок) и материала подложки [12, 13].

Зеркальные покрытия. Создание систем с максимальным коэффициентом отражения на кратных и не кратных целому числу длинах волн, расширение спектрального диапазона, захватывающего области спектра от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной, как и создание узкополосных зеркал, с минимальной шириной области максимального отражения, является актуальной задачей. Задача разработки конструкции таких зеркал в принципе может быть решена с помощью современных методов синтеза многослойных диэлектрических систем. Повышение коэффициента отражения до значения, близкого к ста процентам, значительно увеличивает общую толщину диэлектрической системы, это приводит к тому, что система начинает разрушаться под действием механических напряжений, возникающих в слоях. Возможным выходом из этой ситуации является подбор пар слоев, взаимно компенсирующих как собственные, так и термические напряжения [14].

При создании широкополосных систем перспективно использование металлодиэлектрических систем, подобный подход может быть использован при создании лазерных систем, если напряженность электрического поля световой волны, доходящей до металлического слоя, уменьшается на один-два порядка. Особый интерес представляют системы, в состав которых входят слои с заданным распределением показателя преломления по толщине. В таких системах нет границ разделов между слоями, изготовленными из различных материалов (это значительно увеличивает механическую прочность и лучевую стойкость покрытия), а также возможно реализовать узкополосные системы, работающие как на кратных, так и не кратных целому числу длинах волн [15].

Поляризирующие покрытия. В ряде современных приборов используется излучение как когерентных, так и некогерентных источников с определенным состоянием поляризации, что выдвигает дополнительные требования к поляризации отраженного и прошедшего светового потока. Если для лазерных источников расходимость излучения мала, то для ряда других источников она может достигать нескольких десятков градусов, также они могут обладать

достаточно большим спектральным диапазоном излучения. Это существенно ужесточает требования к конструкции многослойных систем, отражающих или пропускающих излучение с произвольным, предварительно заданным состоянием поляризации и расходимости в широком спектральном диапазоне. Воспроизводимость спектральных характеристик таких покрытий определяется точностью измерений в процессе изготовления и стабильностью режимов осаждения [16].

Степень постоянства толщины слоев многослойных диэлектрических систем определяется функциональным назначением покрытия и находится в интервале 0,01—0,0001. Эти требования к покрытиям существенно ограничивают применимость перечисленных ниже способов изготовления. В настоящее время для получения покрытий используются следующие методы: термическое (резистивное, электронно-лучевое, реактивное, лазерное) испарение веществ в вакууме, катодное (на постоянном токе, высокочастотное, ионно-плазменное) распыление в среде инертных или активных газов, осаждение из растворов пленкообразующих соединений (методы золь-гель), формирование слоев из газовой фазы, содержащей пленкообразующие соединения, травление поверхности подложек и т.д. Выбор способа определяется требованиями к равномерности толщины слоев по поверхности оптического элемента.

Наиболее распространенными в последние годы в оптической промышленности были методы резистивного и электронно-лучевого испарения веществ в вакууме. Методы катодного распыления, в том числе ионно-плазменные, в оптической промышленности использовались для ионно-плазменной обработки оптических поверхностей, окончательной чистки оптических поверхностей перед осаждением слоев, так называемые методы ионной поддержки — для создания слоев с повышенной механической прочностью [17]. Методы осаждения слоев из растворов пленкообразующих соединений активно использовались в оптической промышленности в 1950—1960-х гг. В последние годы к ним снова проявляется повышенный интерес [18, 19]. Наименее используется в настоящее время метод осаждения покрытий из газовой фазы.

Широкое использование термического испарения веществ в вакууме обусловлено наличием методов контроля толщины и показателей преломления слоев в процессе осаждения, возможностью получения пленок с заданным распределением толщины слоев по поверхности элемента, а также сравнительно небольшим временем осаждения одного слоя (скорость осаждения — порядка нескольких нанометров в секунду). Механическая прочность получаемых покрытий относится к нулевой или первой группе (электронно-лучевое испарение) и первой-второй (резистивное испарение). Способ позволяет формировать слои из материалов с любыми значениями температуры испарения.

Основной недостаток катодного распыления — малая скорость осаждения, при скоростях осаждения, сравнимых со скоростью термического испарения, происходит недопустимый разогрев деталей, изготовленных из оптического стекла, до значений, при которых деформируется поверхность.

Формирование покрытий из растворов пленкообразующих соединений — интерес к этому методу в последние годы вызван более глубоким пониманием процессов образования твердой пленки на поверхности оптического элемента, а также возможностью получения слоев с малым показателем преломления благодаря возможности управлять пористостью пленок [20]. Кроме того, легирование пленок позволяет создавать структуры с управляемым поглощением. Необходимость стабилизации свойств пленок с помощью обязательного прогрева существенно увеличивает время формирования одного слоя, однако эта проблема снимается при массовом производстве однотипных покрытий. Равномерность пленок по толщине на поверхности детали, так же как и сама толщина, определяется технологическими факторами (скорость подъема или слива жидкости).

Получение пленок травлением поверхности оптического элемента — один из первых способов создания просветляющих покрытий, широко применялся в оптической промышленности в 1930—1940-х гг., но не используется из-за наличия вредных веществ. В настоящее время к нему снова проявляется интерес в связи с возможностью получения широкополосных просветляющих покрытий, обладающих высокой лучевой стойкостью [18, 19].

Испарение веществ в вакууме позволяет получать слои с заданным распределением толщины слоя по поверхности оптического элемента, при этом точность воспроизведения градиента толщины слоя составляет несколько нанометров на миллиметр. Метод позволяет получать распределение толщины на размерах от нескольких миллиметров до сотен миллиметров с помощью простейших диафрагм, помещаемых между испарителем и деталью [20]. Для контроля распределения толщины слоя в процессе формирования возможно использовать существующие методы фотометрического контроля толщины слоев. Отсутствие пленкообразующих материалов с необходимыми значениями показателей преломления требует формирования слоев одновременно из двух или нескольких испарителей, содержащих разные пленкообразующие материалы. В процессе осаждения на поверхности оптического элемента различных пленкообразующих соединений, не вступающих в химическую реакцию, образуется пленка с показателем преломления, определяемым концентрацией паров, конденсирующихся на поверхности. Преимущество метода термического испарения заключается в том, что существует возможность определения показателя преломления слоя в каждый момент образования пленки и тем самым — управления процессом осаждения.

Градиентные покрытия. Особый тип составляют покрытия с переменным по поверхности элемента амплитудным или энергетическим коэффициентом отражения или пропускания. Одной из областей их использования является лазерная техника, в которой они могут применяться как элементы резонаторов лазеров, формирующих излучение с узкой диаграммой направленности. Конструкция таких систем (показатель преломления, оптическая толщина слоев, распределение толщины по поверхности оптического элемента) определяется требованиями к форме волнового фронта отраженного или прошедшего излучения и величиной максимального и минимального коэффициентов отражения [21, 22].

В общем виде задача одновременного формирования заданных энергетических и фазовых характеристик отраженного или прошедшего излучения с помощью многослойных тонкопленочных систем может быть сформулирована следующим образом: необходимо сконструировать многослойную систему (системы), осаждаемую на одну или несколько поверхностей оптической детали или деталей. Такая система должна иметь не только определенные (заданные) спектральные энергетические характеристики отражения (R), пропускания (T) по поверхности детали, но и формировать заданный волновой фронт отраженного или прошедшего излучения при известной форме фронта падающего излучения (управлять изменением разности фаз между падающим и отраженным по поверхности оптического элемента излучением). Для решения такой задачи необходимо применять покрытия, толщина слоев которых имеет определенное (заданное) распределение по поверхности оптической детали [22, 23].

Все вышесказанное делает проблему формирования слоев с заданным распределением толщины весьма актуальной, так как решить ее необходимо при любом способе использования оптических покрытий. Покрытие, нанесенное на искривленную поверхность (например, сферическую), должно иметь асферический профиль для того, чтобы оно могло определять спектральный состав и энергетические характеристики излучения. Естественно, изменение толщины покрытия по поверхности детали приводит к формированию фронта волны, которое должно учитываться при абберрационном расчете оптического элемента. Исключение составляют оптические поверхности, форма которых совпадает с формой фронта падающей волны. В этом случае покрытие должно иметь толщину, постоянную по поверхности подложки. Следует отметить, что имеющиеся к настоящему времени способы управления профилем

осаждаемых покрытий (например, при помощи масок-экранов) неудовлетворительны по воспроизводимости, точности и производительности, что делает необходимым поиск других, более эффективных способов получения слоев с заданными геометрическими свойствами. Основное влияние на профиль покрытия оказывают эмиссионные характеристики испарителей и расположение экранов и подложек относительно испарителей. Поэтому следует в-первых, исследовать стабильность эмиссионных характеристик испарителей, во-вторых, определить возможность описания эмиссионных характеристик испарителей аналитическими функциями, в-третьих, связать характер распределения толщины слоя по поверхности оптических элементов с эмиссионными характеристиками используемых испарителей. Нами были рассмотрены поверхностные испарители, реализующиеся при термическом и электронно-лучевом испарении [24].

Многослойные диэлектрические системы или отдельные диэлектрические и металлические слои, у которых толщина по поверхности детали изменяется по заданному закону, могут быть использованы и в качестве объектов исследования, что позволит исключить влияние технологических факторов, характеризующих условия осаждения, на оптические постоянные слоев. Под технологическими факторами обычно понимают давление и состав остаточных газов, скорость испарения пленкообразующего материала, материал подложки. Исследование многослойных систем, у которых один или несколько слоев имеют толщину, переменную по поверхности подложки, позволит разработать корректные способы определения показателей преломления и поглощения слоев. В этом случае можно пренебречь их зависимостью от длины волны падающего излучения.

Для создания градиентных лазерных зеркал необходимо установить связь между величиной коэффициента отражения на фиксированной длине волны (интервале длин волн) и изменением оптической толщины одного (нескольких или всех) слоя многослойной диэлектрической системы. Решение этой задачи позволит определить не только многослойные системы, позволяющие создать оптические элементы с заданным распределением коэффициента отражения (пропускания) по их поверхности, но и создать простые методы их экспериментального изготовления. Предлагаемые методы заключаются в использовании простейших диафрагм (экранов), помещенных на пути потока пара между испарителем и подложкой, на которую осаждаются слои с необходимым распределением [22]. Также рассмотрены варианты осаждения градиентных слоев через пульсирующие диафрагмы на оптические элементы, совершающие вращательное, в том числе планетарное, движение. Разработано несколько вариантов технологической оснастки, реализующей различные варианты осаждения слоев через простейшие диафрагмы при термическом испарении материалов в вакууме [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Amotchkina T.* Empirical expression for the minimum residual reflectance of normal- and oblique-incidence antireflection coatings // *Appl. Opt.* 2008. Vol. 47. P. 3109—3113.
2. *Гайнутдинов И. С., Гусев А. Г., Мустаев Р. М., Несмелов Е. А., Никитин А. С.* Двухдиапазонное просветление оптических элементов для тепловизионных приборов // *Оптич. журн.* 2002. Т. 69, № 4. С. 64—66.
3. *Котликов Е. Н., Прокашев В. И., Хонинева В. В., Хонинев А. Н.* Синтез светоделительных покрытий // *Оптич. журн.* 2001. Т. 68, № 8. С. 49—52.
4. *Тихонравов А. В., Трубецков М. К.* Современное состояние и перспективы развития методов проектирования многослойных интерференционных покрытий // *Оптич. журн.* 2007. Т. 74, № 12. С. 66—73.
5. *Архипов С. А., Лысой Б. Е., Потелов В. В., Сенюк Б. Н., Чередниченко О. Б.* Комплексная технология изготовления оптических покрытий со сложным спектральным профилем // *Оптич. журн.* 2007. Т. 72, № 4. С. 66—70.
6. *Гайнутдинов И. С., Иванов В. А., Борисов А. Н., Никитин А. С., Несмелов Е. Л.* Дихроичное покрытие для спектроделительных призмных устройств // *Оптич. журн.* 2002. Т. 69, № 4. С. 60—61.

7. Гайнутдинов И. С., Иванов В. А., Борисов А. Н., Никитин А. С., Несмелов Е. А. Воспроизводимость спектральных характеристик отрезающих фильтров // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 4. С. 62—63.
8. Голдина Н. Д. Нанесение покрытий для лазерной оптики с помощью ионно-плазменного метода // Оптич. журн. 2003. Т. 70, № 3. С. 76—81.
9. Schulz U., Lau K., Kaiser N. Antireflection coating with UV-protective properties for polycarbonate // Appl. Opt. 2008. Vol. 47. P. 83—87.
10. Карасев В. Б., Путилин Э. С., Майа Халед. Неоднородные оптические покрытия для лазерной техники // Сб. тр. Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2000“. 2000. Т. 1. С. 25.
11. Якобсон Р. Неоднородные и совместно напыленные однородные пленки для оптических применений // Физика тонких пленок. 1978. Т. 8. С. 61—105.
12. Галькевич Е. П., Кочерба Г. И., Недоступ В. И., Ранцев А. А. Пленкообразующие материалы для новых задач современной оптики // Оптич. журн. 2006. Т. 73, № 12. С. 82—83.
13. Васильева М. Ф., Герасюк А. К., Гоев А. И., Кириленко В. В., Ноздрачев А. В., Потелов В. В., Сенник Б. Н., Сухачев А. Б. Применение новых пленкообразующих материалов — цирконата гадолиния и цирконата лютеция для получения высококачественных оптических покрытий // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 10. С. 79—84.
14. Гайнутдинов И. С., Несмелов Е. А., Хайбулин И. Б. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения. Казань: Изд-во ФЭН, 2002. 592 с.
15. Гайнутдинов И. С., Несмелов Е. А. и др. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань: Изд-во ФЭН, 2003. 424 с.
16. Гайнутдинов И. С., Иванов В. П., Несмелов Е. А. Назначение и свойства оптических интерференционных покрытий. Казань: Изд-во ФЭН, 2002. 112 с.
17. Гайнутдинов И. С., Мустаев Р. М., Михайлов А. В., Гусев А. Г. Влияние ионного ассистирования на эксплуатационные характеристики оптических покрытий // Оптич. журн. 2001. Т. 68, № 5. С. 29—32.
18. Суйковская Н. В. Химические методы получения тонких прозрачных пленок. Л.: Химия, 1971.
19. Kursawe M., Hofmann T. Antireflective coating on float glass for solar applications // Glass Processing Days. 2003. P. 382—384.
20. Thomas I. M. Method for the preparation of porous silica antireflection coatings varying in refractive index from 1,22 to 1,44 // Appl. Opt. 1992. Vol. 31, N 28. P. 6145—6149.
21. Путилин Э. С., Губанова Л. А., Студеникин Л. М. Синтез условий осаждения градиентных лазерных зеркал // Оптич. журн. 2003. Т. 70, № 8. С. 50—53.
22. Губанова Л. А., Карасев В. Б., Путилин Э. С. Использование подвижных диафрагм при формировании слоев переменной толщины // Оптич. журн. 2003. Т. 70, № 11. С. 45—48.
23. Губанова Л. А., Путилин Э. С. Формирование градиентных слоев на сферических подложках // Оптич. журн. 2008. Т. 75, № 4. С. 87—91.
24. Чжон Сун Ким. Эмиссионные характеристики электронно-лучевых испарителей // Оптич. журн. 2000. Т. 67, № 4. С. 100—103.

Сведения об авторах**Эдуард Степанович Путилин**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; заведующий кафедрой; E-mail: eputilin@yandex.ru

Людмила Александровна Губанова

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптических технологий; E-mail: la7777@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптических технологийПоступила в редакцию
14.04.10 г.