

Интенсивно развивающиеся наука и техника в настоящее время предъявляют к оптическим системам и комплексам, в том числе и лазерным, очень высокие требования, а именно: уменьшение массогабаритных характеристик, максимальное светопропускание, функционирование одновременно в различных спектральных диапазонах, улучшение пространственно-энергетических характеристик и т. д.

Применение математических методов синтеза оптических покрытий и акустооптических спектрофотометров в вакуумных технологиях изготовления оптических покрытий и коррекционных слоев благодаря прецизионному контролю толщины и показателя преломления напыляемых слоев в реальном масштабе времени позволяет решить ряд серьезных проблем не только сегодняшнего дня (повышение надежности технологического процесса и выхода годных деталей). Одним из самых перспективных направлений в оптике и оптических технологиях является промышленное освоение технологии изготовления градиентных покрытий и градиентных оптических элементов, которые до настоящего времени не нашли широкого применения из-за сложности практической реализации.

Использование акустооптического спектрофотометра и необходимая модернизация существующего вакуумного оборудования позволят ре-

шить ряд серьезных технических проблем и создать серийную технологию изготовления принципиально нового класса оптических элементов с качественно новыми выходными параметрами: градиентных, градиентно-асферических и др., а также ускорить освоение промышленных технологий изготовления градиентных покрытий [4].

Перспективно также использование акустооптического спектрофотометра в качестве системы управления автоматизированными вакуумными комплексами для изготовления прецизионных оптических покрытий и коррекционных слоев.

Л и т е р а т у р а

1. Бельский А.Б. и др. Применение акустооптического спектрофотометра в технологии изготовления оптических покрытий лазерных зеркал//XI Международная конференция. "Оптика лазеров-2003". — С.-Петербург, 2003.
2. Optilayer for Windows. User's Guide. Optilayer Ltd. 1997.
3. Копылов С. М. и др. Скоростной акустооптический спектрофотометр AOS-3S для контроля изготовления оптических покрытий//Лазерные новости. 1995. Вып. 4. С. 3—4.
4. Сенник Б. Н. Дис. на соиск. ... канд. техн. наук "Технологические процессы изготовления точных градиентных и асферических элементов". — М., 2002.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Use of acoustooptical spectrophotometers for making gradient optical components and extracomplex optical coatings

A. I. Goev, V. V. Potelov, B. N. Senik, A. K. Gerasyuk
JSC "Krasnogorsky Zavod im. S. A. Zvereva", Krasnogorsk, Russia

O. B. Cherednichenko
POLYUS Science-and-Research Institute im. M. F. Stelmakha, Moscow, Russia

The precision control of the optical thickness of layers during vacuum evaporation is of great importance for the technologic process of applying optical coatings by means of vacuum deposition. Improvement of optical control methods permits to increase output of ready items, to improve spectral characteristics of coatings, to realize evaporation of the principally new coatings and to make the optical components of a new generation. The most informative method of precision optical control is effected in the spectrovisor mode, that is in the process of evaporation the control of the whole spectral characteristic of the coating takes place in the real time.

УДК 621.535.683

Особенности получения новых расчетных показателей преломления в оптических слоях при их нанесении в вакууме

А. И. Гоев, В. Г. Крючков, В. В. Потелов, Б. Н. Сенник, А. К. Герасюк
 ФНПЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", Россия

Разработаны основные технологические принципы получения в оптических слоях, наносимых испарением в вакууме, требуемых расчетных значений как постоянных, так и меняющихся по толщине показателей преломления. Результаты исследований могут быть использованы при конструировании безабберационных оптических элементов.

Теория расчетов при конструировании эффективных оптических покрытий дает значения показателей преломления слоев, которые часто существенно отличаются от показателей преломления пленкообразующих материалов (ПОМ), которыми в настоящее время располагает оптическая отрасль. Для преодоления указанных ограничений выработана методика, позволяющая получать ПОМ с необходимыми значениями показателей преломления на базе ПОМ, серийно выпускаемых и широко применяемых в оптическом производстве.

Обеспечить технически предлагаемую методику можно с помощью известного в химии закона смешения в следующей его интерпретации:

$$n_{\text{mix}} = \frac{kn_1 + mn_2}{k + m},$$

где n_{mix} — показатель преломления нового пленкообразующего материала, получаемого из смеси двух исходных пленкообразующих материалов;

n_1, n_2 — показатель преломления первого и второго компонентов смеси, соответственно;

k, m — доля первого и второго компонентов в смеси, об. %, соответственно;

Можно подобрать комбинации ПОМ из числа освоенных в технологии изготовления оптических вакуумных покрытий и попытаться создать на базе таких бинарных систем оптические среды в слоях,

принимая постоянные значения показателя преломления в интервале от n_1 до n_2 .

В результате проведенного анализа выбранные ПОМ (оксиды и фториды), их физико-технические характеристики, а также способы их испарения в вакууме сведены в таблицу.

В таблице можно найти комбинации ПОМ, представляющих практический интерес для создания пленочных градиентных сред и функциональных слоев с требуемыми в соответствующих пределах показателями преломления:

Комбинация	Диапазон показателя преломления
SiO ₂ - TiO ₂	1,46-2,35
SiO ₂ - CeO ₂	1,46-2,3
Al ₂ O ₃ - CeO ₂	1,63-2,3
SiO ₂ - Al ₂ O ₃	1,46-1,63
MgF ₂ - CeF ₂	1,38-1,63

Рассмотрим подробнее комбинацию SiO₂- TiO₂.

Для SiO ₂ имеем:	Для TiO ₂ имеем:
$T_{\text{smelt}} = 1700 \text{ }^\circ\text{C}$.	$T_{\text{smelt}} = 1640 \text{ }^\circ\text{C}$.
Плотность 2,7 г/см ³ .	Плотность 4,9 г/см ³ .
$T_{\text{vap}} = 1600-2500 \text{ }^\circ\text{C}$.	$T_{\text{vap}} = 1800-2200 \text{ }^\circ\text{C}$.
$n = 1,46$.	$n = 2,2-2,35$.
Электронно-лучевое испарение.	Электронно-лучевое испарение.
Слои имеют сжимающее напряжение	Слои имеют растягивающее напряжение

Пленкообразующий материал	Показатель преломления	Плотность, г/см ³	Температура, °C		Способ испарения
			плавления	испарения	
SiO ₂	1,46	2,7	1700	1600-2500	Электронно-лучевой То же " Электронно-лучевой (возможен резистивный) То же "
Al ₂ O ₃	1,63	4,0	2015	2000-2400	
TiO ₂	2,35	4,9	1640	1800-2200	
CeO ₂	2,3	7,3	1950	2000-2400	
CeF ₃	1,63	5,8	1320	1300-1600	То же "
MgF ₂	1,38	3,2	1260	1300-1500	

© Гоев А. И., Крючков В. Г., Потелов В. В., Сенник Б. Н., Герасюк А. К., 2007

показателями преломления 1,46—2,35 (см. рисунок).

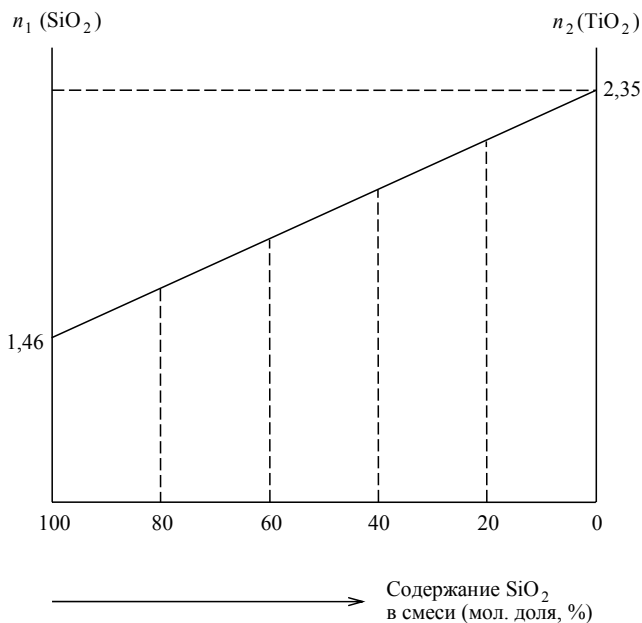


Диаграмма значений показателя преломления в коррекционном слое, полученном одновременным испарением оксида кремния SiO₂ и оксида титана TiO₂ из двух испарителей в вакууме

Например, при приготовлении смеси из соотношения компонентов 1:1 (об. %) по известному закону смешения можно рассчитать показатель преломления оптической среды

$$n_{\text{mix}} = \frac{1 \cdot 1,46 + 1 \cdot 2,35}{1 + 1} = 1,905.$$

Можно рассчитать также соотношение этих же компонентов смеси для получения оптической среды с заданным значением показателя преломления. Пусть, например, необходимо получить оптическую среду с $n = 1,5134$. Используя тот же закон смешения и условно принимая содержание второго компонента (TiO₂) в объемных процентах за единицу, а содержание первого компонента (SiO₂) за x , запишем зависимость

$$1,5134 = \frac{x \cdot 1,46 + 1 \cdot 2,35}{x + 1};$$

находим $x = 13,8$.

Таким образом, для получения оптической среды с $n = 1,5134$ необходимо использовать компоненты в соотношении 13,8 объемных частей SiO₂ и одну объемную часть TiO₂. Не представляет трудность пересчета объемных частей в весовые части, зная плотности компонентов. Так, для приведенного примера весовое содержание компонентов составляет 37,26 г SiO₂ и 4,9 г TiO₂.

Смеси, получаемые на основе окислов кремния и титана, можно условно называть "кремне-титановый оксид".

По аналогии оптические среды, получаемые по разработанной методике из приведенных выше комбинаций материалов, имеют следующие названия:

кремнецириевый оксид,
цириевоалюминиевый оксид;
кремнеалюминиевый оксид;
магниевоцириевый фторид.

Накопленный к настоящему времени опыт [1] и приведенные данные свидетельствуют о том, что указанные комбинации пленкообразующих материалов пригодны и в тех случаях, когда необходимо получать коррекционные слои с непрерывно изменяющимся показателем преломления. Однако в этих случаях каждый из материалов испаряется из отдельного испарителя; изменение (варьирование) скорости испарения хотя бы одного из компонентов приводит к изменению его концентрации в формирующемся на оптической подложке слое, а также к изменению оптических характеристик коррекционного слоя [2].

В практике получения оптических пленок из некоторых пленкообразующих материалов возможно изготовление пленок с меняющимся значением показателя преломления в слоях, формируемых при испарении в вакууме только одного исходного материала. Из физики тонких пленок известны факторы, влияющие на величину (значение) показателя преломления в диэлектрических средах.

Один и тот же материал может иметь различные показатели преломления в зависимости от кристаллической структуры. Например, для TiO₂ характерна весьма заметная зависимость показателя преломления от температуры подложки, определяющей структуру пленок, так как в интервале температур 20—400 °С пленки могут быть аморфными либо со структурой анатаза или рутила, либо представлять собой смесь аморфной и кристаллической фаз.

Следовательно, в зависимости от температуры подложки показатель преломления пленок TiO₂ изменяется в пределах 1,9—2,5 ($\lambda = 550$ нм).

Анализ результатов отечественных и зарубежных исследований в области оптических покрытий в вакууме из различных пленкообразующих материалов позволяет создать базу данных для выбора целого ряда как отдельных пленкообразующих материалов, так и их различных комбинаций.

Оптимальным исходным материалом для получения градиентных слоев в целях их использования в видимой и ближней ИК-областях спектра являются окислы кремния различных вариаций состава SiO_x.

Основные принципы и методы получения тонких пленок напылением в высоком вакууме подробно изучены. Для испарения SiO используют вольфрамовые или танталовые испарители прямого нагрева, для SiO₂ — электронную пушку с током эмиссии до 250 мА при ускоряющем напряжении до 20 кВ.

Для обеспечения достаточно высокой и постоянной скорости напыления SiO₂ и во избежание перегрева и разложения окисла применяется электронный пучок диаметром 15 мм. В полученных таким образом пленках SiO₂ практически отсутствует поглощение в видимой и ближней УФ-областях спектра.

Практические результаты, полученные в ОАО "Красногорский завод" при проведении экспериментальных исследований последних лет, подтверждают, что окислы кремния SiO_x являются наиболее приемлемым и доступным материалом для получения градиентно-асферических слоев на коррекционных оптических элементах видимого диапазона спектра. Пленки SiO в видимой области спектра имеют $n = 2,0$. Если пленки частично окислены, то показатель преломления уменьшается и достигает величины 1,55 при составе Si_2O_3 . Дальнейшее окисление дает величину показателя преломления для SiO_2 , равную 1,46.

Расчетные функции распределения показателя преломления обеспечиваются как за счет варьирования параметров режима технологического процесса (степень вакуума, скорость осаждения слоя, температура подложки, избыток кислорода в вакуумной камере и др.), так и посредством перераспределения наносимого материала по поверхности подложки через функциональные маски.

При отлаженном контролируемом процессе оказалось возможным управляемое изготовление градиентных коррекционных слоев в течение одного цикла напыления на стандартных промышленных вакуумных напылительных установках.

Заключение

Проблема синтеза (конструирования) — одна из наиболее актуальных и труднорешаемых в области теории интерференционных покрытий.

Использование предлагаемой методики открывает возможность получения эквивалентных согласующих слоев с непрерывно изменяющимся по толщине показателем преломления, что значительно облегчает изготовление оптических вакуумных покрытий, обеспечивающих наилучшее приближение к заданной спектральной кривой.

Особо необходимо отметить, что применение принципов получения слоев с изменяющимся значением показателя преломления создает новые коррекционные возможности при разработке безабберационных оптических элементов для перспективных оптических систем высокого качества. Разработка защищена патентом на изобретение [3].

Литература

1. Риттер Э. Пленочные диэлектрические материалы для оптических применений//Физика тонких пленок. — М.: Мир. 1978. Т. 8. С. 7–60.
2. Крючков В. Г., Сенник Б. Н. Вакуумные методы получения градиентных оптических пленок//Обзор № 5536. — М.: НТЦ, "Информтехника", 1992.
3. Пат. 2078467 РФ от 27.04.1997 г. Способ получения коррекционных слоев на оптическом элементе/Крючков В. Г., Бездидько С. Н., Потелов В. В., Заказнов Н. П., Сенник Б. Н.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Peculiarities of obtaining new design indices of refraction in optical layers when depositing in vacuum

A. I. Goev, V. G. Kryuchkov, V. V. Potelov, B. N. Senik, A. K. Gerasyuk
JSC "Krasnogorsky Zavod im. S. A. Zvereva", Russia

The main technological principles have been developed which permit to gain the required design values of both the constant refraction indices and that ones which change with thickness, the optical layers being applied experimentally by vacuum beam evaporation.

* * *