

Промышленная технология изготовления отражающих, просветляющих, спектроделительных покрытий

В. В. Потелов

Рассмотрена методика синтеза конструкционных оптических покрытий и метод контроля диэлектрических покрытий с помощью акустооптического спектрофотометра.

PACS: 06.60.-c

Ключевые слова: многослойные покрытия, акустооптический спектрофотометр.

Введение

Промышленное изготовление высококачественных многофункциональных оптических и оптико-электронных систем и элементов различного назначения во многом зависит от уровня технологий нанесения оптических покрытий (ОП). В частности, при разработке и создании лазеров, основное внимание, как правило, уделяется достижению максимальной выходной энергии или мощности генерации за счет изготовления высокоэффективных активных сред и зеркал со сложным спектральным профилем коэффициента отражения и высокой крутизной этого профиля в различных спектральных диапазонах.

Проблематичным является достижение низких значений отражения, особенно в тех случаях, когда область низкого отражения должна находиться на небольшом расстоянии (по длине волны) от области высокого отражения [1].

При создании оптических комплексов для дистанционного зондирования Земли из космоса наряду с уже достигнутыми предельными пространственными информационными характеристиками (полоса захвата, пространственное разрешение, точность фотограмметрической привязки) современная аппаратура должна обеспечивать высокие радиометрические характеристики и спектральное разрешение. Достижение вышеуказанных требований при использовании традиционной технологии нанесения тонкослойных диэлектрических покрытий крайне затруднительно. В настоящее время в результате проведения фундаментальных теоретических и практических исследований в области синтеза ОП, разработана промышленная технология изготовления оптических элементов с особо сложными высококачественными покрытиями.

Физические и математические основы технологии

Математически многослойные ОП описываются системой, состоящей из конечного числа слоев с различными показателями преломления и толщинами, заключенными между двумя полубеско-

Потелов Владимир Васильевич, ген. директор.
ЗАО "Зениттехсервис".
Россия, 143400, г. Красногорск, Московская обл., ул. Речная, 8.
Тел. (495) 561-87-42.
E-mail: kmz214@zenit-foto.ru

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2009 г.

нечными средами. Предполагается, что слои однородны, изотропны, имеют параллельные границы. Падающее на ОП излучение представляется линейно-поляризованной монохроматической плоской волной. Определение отражения, пропускания и поглощения многослойной тонкопленочной системы с точки зрения электромагнитной теории сводится к решению уравнений Максвелла при заданных граничных и начальных условиях, т. е. определению стационарных амплитуд векторов напряженности электрического и магнитного полей на всех границах многослойной системы при падении световой волны с заданными характеристиками.

Для создания ОП с желаемыми спектральными характеристиками требуется решить задачу синтеза конструкции многослойной пленочной системы, а именно:

- выбрать материалы, образующие тонкие пленки;
- задать показатели преломления для выбранных материалов;
- задать показатели преломления сред, обрамляющих многослойную систему;
- подобрать необходимые количество, толщины слоев из выбранных материалов и последовательность их чередования в случае, если число выбранных материалов более 3.

Успешное решение задачи синтеза определяет выбор метода оптимизации.

В основе всех методов оптимизации лежит предположение о том, что всю совокупность интересующих нас свойств ОП можно охарактеризовать одним числом F , зависящим от его конструктивных параметров. Это число F называется показателем качества или целевой функцией. С помощью F оценивается отклонение желаемой спектральной характеристики от ее приближения.

Таким образом, задача синтеза ОП сводится к минимизации целевой функции на ограниченном множестве конструктивных параметров. Ограничения конструктивных параметров определяются возможностями технологической реализации фильтра.

Среди известных методов оптимизации неравнотолщинных многослойных интерференционных покрытий наилучшие практические результаты удается достичь, используя "технику игольчатой оптимизации". Суть этого подхода сводится к следующим основным шагам:

1. Задание начальной конструкции фильтра.
2. Оптимизация показателя качества F путем вариации толщин слоев фильтра с использованием любого известного метода оптимизации (градиентного спуска и др.).

3. Вычисление некоторой P -функции, являющейся коэффициентом, связывающим приращение целевой функции σF с толщиной тонкого ("игольчатого") слоя, установленного в конструкцию фильтра, проверка достижения цели оптимизации $\sigma F = 0$.

4. Выбор места установки игольчатого слоя в текущую конструкцию фильтра, такого, что конструкция фильтра с игольчатым слоем будет иметь показатель качества выше, чем текущая конструкция.

5. Установка в конструкцию фильтра игольчатого слоя и переход к шагу 2. В отличие от других методов синтеза ОП, техника игольчатой оптимизации гарантирует достижение глобального оптимума при произвольной начальной конструкции ОП. В частности, расчет конструкций ОП спектроделительного модуля проводился с использованием техники игольчатой оптимизации с помощью программы OptiLayer, разработанной коллективом ВЦ МГУ под руководством профессора А. В. Тихонравова.

В результате расчетов найдены конструкторско-технологические решения, обеспечивающие требуемые характеристики спектроделительного модуля оптико-электронного комплекса для дистанционного зондирования Земли из космоса.

Примеры реализации технологии

Ниже представлены результаты расчета спектроделительного покрытия:

- рабочий угол 14,7 град;
- среда — стекло К8;
- используемые вещества ZnS ($n = 2,3$) и MgF₂ ($n = 1,38$);
- число слоев — 27;
- коэффициент пропускания на длине волны 610 нм равен нулю;
- коэффициент пропускания на длине волны 600 нм не более 0,07;
- отражение светового потока в области спектра от 420 до 580 нм. Коэффициент пропускания не более 0,015;
- конструкция: 0,36Н; 0,62L; 1,00Н; 0,97L; 0,95Н; 0,46L; 0,05Н; 0,38L; 0,90Н; 0,24L; 0,93Н; 0,70L; 0,97Н; 0,16L; 0,97Н; 0,70L; 0,93Н; 0,24L; 0,90Н; 0,38L; 0,04Н; 0,46L; 0,95Н; 0,98L; 1,00Н; 0,63L; 0,36Н;
- пропускание светового потока в области спектра 620—1100 нм. Коэффициент спектрального пропускания указан ниже:

Длина волны, нм	Коэффициент пропускания
440.....	0,00015
520.....	0,00044
560.....	0,01212
600.....	6,27407
640.....	99,99797
680.....	99,87104
720.....	99,99911
760.....	99,65541
800.....	99,82125
840.....	99,80155
880.....	99,85909
920.....	99,71742
960.....	99,97704
1000.....	99,43647
1080.....	99,71013
1120.....	96,54548

Точность и воспроизводимость теоретического решения вышеуказанного покрытия с учетом использования акустооптического спектрофотометра возможных колебаний технологических параметров работы вакуумной установки ВУ-2М находятся в пределах 0,3 % от расчетной спектральной кривой по всему рабочему спектральному диапазону.

В технологическом процессе нанесения диэлектрических покрытий посредством осаждения веществ в вакууме важнейшую роль играет точность выдерживания толщин слоев в процессе нанесения многослойной конструкции покрытия.

Совершенствование методов оптического контроля позволяет повысить выход годных изделий, улучшить спектральные характеристики покрытий, реализовать напыление принципиально новых покрытий, в том числе неравнотолщинных, ускорить процесс освоения новых типов покрытий.

Наиболее информативный метод оптического контроля реализуется в режиме спектровизора, т. е. контроля всей спектральной характеристики покрытия в процессе напыления в реальном масштабе времени. Такой метод может быть, в частности, реализован с помощью акустооптического спектрофотометра AOS-4SW (разработчик и изготовитель — ФГУП «НИИ "Полус"» им. М. Ф. Стельмаха).

Скоростные акустооптические спектрофотометры AOS-3S, созданные в 90-х годах, нашли свое место в системах оптического контроля вакуумных напылительных установок, предназначенных для нанесения оптических тонкопленочных диэлектрических покрытий.

Рабочий диапазон длин волн спектрофотометра AOS-3S составляет 37—1175 нм. Однако в последние годы значительно возрос интерес к ОП, работающим в диапазоне длин волн 1,3—1,6 мкм. Этот интерес в первую очередь обусловлен интенсивным развитием устройств оптоволоконной связи. Диапазон в районе 1,5 мкм также используется в безопасных для глаз лазерных дальнометрах.

Несмотря на то, что AOS-3S позволяет вести эффективный контроль процесса нанесения покрытий, работающих в диапазоне 1,3—1,6 мкм (например, путем контроля спектральных характеристик в видимом диапазоне длин волн), тем не менее для ряда типов покрытий, в частности для просветляющих покрытий, в том числе широкополосных, лучшие результаты дает прямой контроль по диапазону длин волн, перекрывающему рабочий диапазон длин волн покрытия.

В связи с вышеизложенным была проведена модернизация спектрофотометра AOS-3S, направленная на расширение его рабочего диапазона до 1,65 мкм.

Рабочий диапазон длин волн акустооптического спектрофотометра в основном определяется следующими факторами:

- рабочим диапазоном длин волн акустооптического фильтра (АОФ);
- рабочим диапазоном длин волн источника света;
- диапазоном чувствительности фотоприемника.

Рабочий диапазон спектрофотометра AOS-3S составляет 370—1175 нм и ограничен диапазоном чувствительности используемых фотоприемников — кремниевых фотодиодов типа S1223 Hamamatsu.

Использованные в спектрофотометрах AOS-3S коллинеарные АОФ на звукопроводах из кристаллического кварца также имеют ограничение по рабочему диапазону длин волн. Длина волны настройки рассматриваемого АОФ определяется по формуле

$$\lambda = V \cdot (n_e(\lambda) - n_o(\lambda)) / (f \cdot \cos \theta),$$

где V — фазовая скорость акустической волны; n_e, n_o — показатели преломления для линейно поляризованных оптических волн, электрические векторы которых параллельны плоскости рисунка и перпендикулярны ей, соответственно;

f — частота звуковой волны;

θ — угол между волновым вектором акустической волны и осью звукопровода (геометрия звукопровода АОФ рассчитана таким образом, что лучевые векторы обеих оптических волн и акустической волны коллинеарны продольной оси звукопровода, при этом $\theta = 21,3^\circ$).

Входное волновое сопротивление АОФ, как правило, удается согласовать (с приемлемым уровнем коэффициента стоячей волны (КСВ)) с волновым сопротивлением ВЧ-кабеля (50 Ом) в октавном диапазоне частот, т. е. в диапазоне частот $\Delta f \approx f_2 - f_1$, где $f_2 \approx 2f_1\lambda$.

Если учесть, что для кристаллического кварца $n_e(\lambda) - n_o(\lambda)$ медленно уменьшается с ростом λ , то получим, что для одного АОФ достижимый рабочий диапазон длин волн $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ несколько меньше октавы, т. е. $\lambda_2 \leq 2\lambda_1$. Таким образом, для перекрытия диапазона длин волн 370—1175 нм в AOS-3S пришлось использовать два АОФ.

Для расширения рабочего диапазона длин волн спектрофотометра AOS-3S потребовалось ввести в конструкцию акустооптического монохроматора дополнительный (третий) канал со своим АОФ; фотоприемное устройство дополнить фотоприемником, чувствительным к диапазону длин волн 1,3—1,6 мкм; расширить диапазон управляющих частот блока управления и регистрации с 380 до 1050 нм. Модернизированному спектрофотометру было присвоено наименование AOS-4SW.

В качестве фотоприемника дополнительного канала применен InGaAsP-фотодиод типа ДФД2000ТО (отечественной фирмы DILAS), имеющий достаточно высокую чувствительность в области длин волн 0,95—1,65 мкм.

Спектрофотометр AOS-4SW укомплектован новым по сравнению с AOS-3S блоком управления и регистрации, имеющим лучшие массогабаритные характеристики.

Широкодиапазонный акустооптический спектрофотометр AOS-4SW успешно прошел испытания и используется в серийном производстве на ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева".

Заключение

Предприятие ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева" в последние 10 лет использует данную технологию для изготовления особо сложных высококачественных покрытий и в процессе освоения новых типов покрытий. В частности, изготовлена гамма оптических элементов для твердотельных лазеров, работающих на безопасной длине волны 1,54 мкм с лучевой прочностью не менее 800 МВт/см² при длительности импульса 10 см² и диаметре сфокусированного излучения не менее 0,1 мм.

Литература

1. Гоев А. И., Потелов В. В., Сенник Б. Н. и др. Применение акустооптических спектрофотометров для изготовления градиентных оптических элементов и особо сложных оптических покрытий//Прикладная физика. 2007. № 1. С. 146—151.

Industrial manufacturing techniques of reflecting, clarifying and spectrodividing covering

V. V. Potelov

Zverev Krasnogorsk Plant, 8 Rechnaya str., 143400, Krasnogorsk, Moscow Region, Russia

The technique of synthesis of constructional optical covering and quality monitoring of dielectric coverings by means of the acousto-optical spectrophotometer are considered.

PACS: 06.60.-c

Keywords: multilayered coverings, acousto-optical spectrophotometer, technique.

Bibliography — 1 references.

Received 10 September 2009