

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики полупроводников и оптоэлектроники

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ

МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

(лабораторная работа по курсу «Квантовая и оптическая электроника»)

Нижний Новгород, 2007

*Учебно-методические материалы подготовлены в рамках
инновационной образовательной программы ННГУ:
Образовательно-научный центр
«Новые многофункциональные материалы и нанотехнологии»
Национального проекта «Образование»*

УДК 621.315.592:61

Синтез и анализ многослойных оптических систем: Лабораторная работа по курсу «Квантовая и оптическая электроника» / Сост. А.И. Машин, А.В. Ершов. – Н. Новгород: ННГУ, 2007. – 21 с.

Настоящее описание предназначено для студентов старших курсов физического факультета ННГУ, обучающихся по специальности 210601 – «Нанотехнология в электронике».

Рис. 2.

Составители: докт. физ.-мат. наук, профессор А.И. Машин
 канд. физ.-мат. наук, доцент А.В. Ершов

Рецензент: докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией электроники
 твёрдого тела НИФТИ ННГУ В.Г. Шенгуров

Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2007

Целью настоящей лабораторной работы является развитие практических навыков, самостоятельного мышления студентов в освоении лекционного курса «Квантовая и оптическая электроника» на примере решения задач об анализе и синтезе многослойных оптических систем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Используя явление интерференции в многослойных оптических системах студенту предлагается рассчитать и изготовить оптическое покрытие для управления спектральным составом или волновым фронтом оптического излучения, измерять оптические характеристики полученной структуры.

Для выполнения работы студенту предлагается:

1. Установка вакуумного напыления оптических покрытий ВУ-1А с системой фотометрического контроля оптической толщины пленки СФКТ-751В (ЛОМО) или монитором оптических покрытий на базе спектропов S150-2 (Солар ТИИ);
2. Набор пленкообразующих веществ, различающихся величиной показателя преломления;
3. Персональный компьютер и набор подпрограмм, который позволяет:
 - определять коэффициенты пропускания и отражения при падении плоской монохроматической волны с частотой ω из внешней среды на покрытие под некоторым углом θ_0 . Имеется возможность задавать две различные поляризации: электрический вектор лежит в плоскости падения и перпендикулярен этой плоскости;
 - проводить численную оптимизацию пленочных функционалов;
 - получать численные решения системы нелинейных алгебраических уравнений.
4. Монохроматор МДР-204 (ЛОМО Фотоника) на диапазон длин волн 0.4-1.3 мкм и спектрофотометр Cary 5000 (1.1-3.3 мкм) с дополнительной оснасткой для измерения спектров пропускания и отражения покрытий.

Преподаватель определяет тип оптического элемента, который необходимо изготовить студенту, параметры требуемой характеристики и точность их аппроксимации.

В некоторых случаях может ставиться обратная задача: используя представленные возможности, студент получает многослойное оптическое покрытие, измеряет его оптические характеристики и, написав программу для анализа многослойных оптических покрытий, сравнивает расчетную характеристику с измеренной.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Многослойные оптические покрытия изготавливают в виде системы тонких слоев, последовательно наносимых на какую-либо поверхность. Эту поверхность принято называть подложкой. Поскольку вся многослойная система имеет толщину порядка одной или нескольких длин волн падающего света, а ее поперечные размеры оказываются на много порядков больше, слои естественно считать неограниченными по двум направлениям, т. е. получаем модель многослойного покрытия, изображенную на рис. 1.

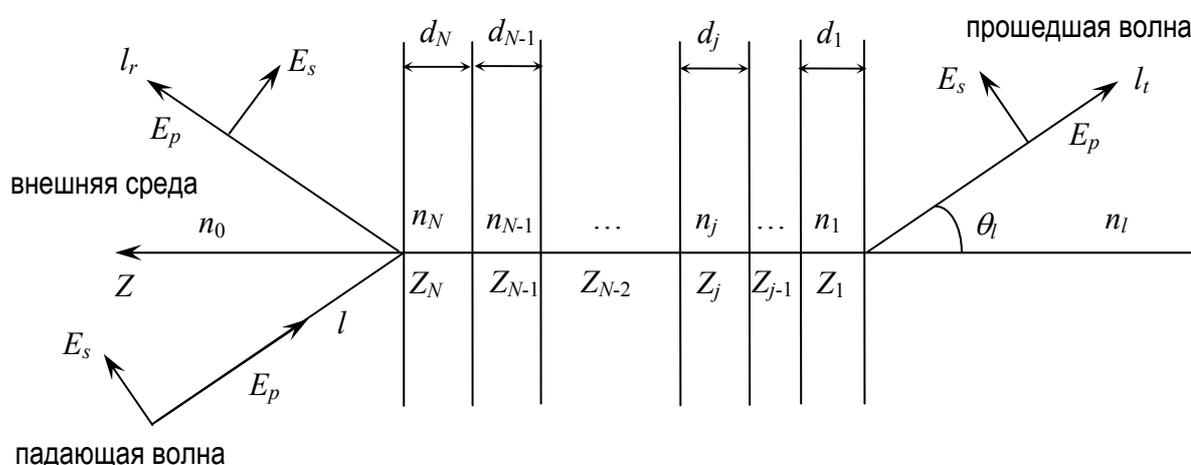


Рис. 1. Многослойная оптическая система

Ось Z образует нормаль к поверхности покрытия. Через Z_1, \dots, Z_N обозначены координаты границ раздела слоев; n_1, \dots, n_N – их показатели преломления; n_0 и n_l – показатели преломления внешней среды и подложки соответственно.

Термины s - и p -поляризованная волна применяются для электромагнитных волн, поляризованных, соответственно, в плоскости падения и перпендикулярно ей.

Для решения задач анализа и синтеза многослойных оптических систем часто используется модель, изображенная на рис. 2.

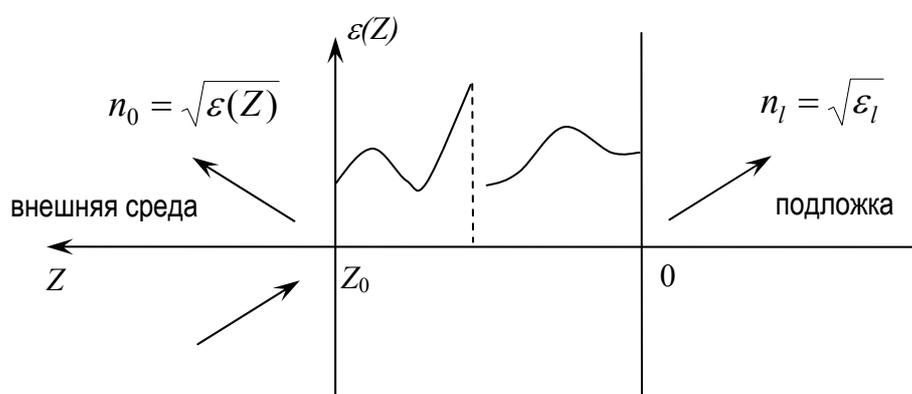


Рис. 2. Среда с кусочно-непрерывным распределением диэлектрической проницаемости

В данном случае многослойное покрытие удобно описывать распределением диэлектрической проницаемости $\varepsilon(Z)$ вдоль нормали к подложке. Z_0 – общая толщина покрытия.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Задача анализа многослойных систем заключается в расчете спектральных коэффициентов пропускания и отражения при заданных параметрах среды. Многослойное оптическое покрытие, изображенное на рис. 1, полностью описывается $2N$ -мерным вектором параметров $\vec{n} = \{d_1, \dots, d_N, n_1, \dots, n_N\}$. Амплитудные коэффициенты отражения s - и p -поляризованных волн можно определить из рекуррентных соотношений (1) и (2):

$$r_0 = \frac{P_1 - P_l}{P_1 + P_l}, \quad r_j = \frac{\rho_j + r_{j-1} \exp(2i\varphi_j)}{1 + \rho_j \cdot r_{j-1} \exp(2i\varphi_j)}, \quad j = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где r_j – коэффициенты отражения от системы первых j слоев;

ρ_j – коэффициенты отражения от границ раздела слоев;

φ_j – набеги фазы в слоях.

Параметры ρ_j и φ_j определяются по формулам:

$$\rho_j = \frac{P_{j+1} - P_j}{P_{j+1} + P_j}, \quad \varphi_j = k \cdot n_j \cdot \cos \theta_j \cdot d_j, \quad (2)$$

где $P_j = n_j \cdot \cos \theta_j$ – для s -поляризованной волны и $P_j = n_j / \cos \theta_j$ – для p -поляризованной волны, а углы θ_j – углы распространения волны в слоях – определяются из закона Снеллиуса:

$$n_j \cdot \sin \theta_j = n_l \sin \theta_l = n_0 \sin \theta_0.$$

Амплитудные коэффициенты отражения r_s, r_p совпадают с коэффициентом r_N , вычисленным по формуле (1) для соответствующих поляризаций. Энергетические коэффициенты отражения равны:

$$R_s = |r_s|^2, \quad R_p = |r_p|^2.$$

Для непоглощающей многослойной среды все показатели преломления вещественны, и энергетические коэффициенты пропускания $T_{s,p}$ выражаются через $R_{s,p}$:

$$T_{s,p} = 1 - R_{s,p}.$$

В случае поглощающих сред показатель преломления представляется в комплексной форме

$$\tilde{n} = n - i\chi,$$

где χ - коэффициент экстинкции, а для расчета $T_{s,p}$ следует использовать рекуррентные формулы для амплитудных коэффициентов пропускания $t_{s,p}$ или какой-либо рекуррентный метод, позволяющий одновременно вычислять r и t , например матричный метод Абея [1].

Для расчета спектральной зависимости коэффициентов пропускания и отражения в случае многослойных сред с кусочно-непрерывным распределением параметров (см. рис. 2) получают обыкновенные дифференциальные уравнения из уравнений Максвелла для тангенциальных компонент вектора электрического и магнитного полей для s - и p -поляризованных волн [2].

Спектральные зависимости коэффициентов могут быть рассчитаны путем последовательного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений для всех значений частот в выбранной области [3].

ЗАДАЧА СИНТЕЗА ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

При синтезе многослойного покрытия в некотором спектральном диапазоне $[k_1, k_2]$ (k – волновой вектор) задают требуемый спектральный коэффициент $f_0\{k\}$ и вычисляют вектор параметров \vec{u} , позволяющий реализовать требуемую зависимость $f_0\{k\}$. Здесь через f обозначают спектральную зависимость коэффициентов пропускания или отражения.

Если, как отмечалось выше, выбором модели полностью задается алгоритм определения любой спектральной зависимости коэффициента f , т. е. полностью задается оператор прямой задачи \vec{b} , ставящий в соответствие вектору \vec{u} функцию $f_u(k)$:

$$f_u = \vec{b} \cdot \vec{u}, \quad (3)$$

то задача синтеза является типичной обратной задачей. Обратные задачи математической физики оказываются чаще всего некорректными [4]. Поэтому под синтезом обычно понимают возможность определения типового вектора параметров \vec{u} , для которого соответствующий ему спектральный коэффициент $f_u = \vec{b} \cdot \vec{u}$ с некоторой точностью аппроксимирует заданный.

Для того чтобы конкретизировать понятие «решения» в данном случае, введем оценку близости функций $f_u(k)$ и $f_0\{k\}$ в заданном спектральном диа-

пазоне $[k_1, k_2]$. Для этой цели пользуются обычно функционалом невязки или критерием качества:

$$G(\vec{u}) = \int_{k_1}^{k_2} \rho(k)(f_u(k) - f_0(k))^2 dk \equiv G\left\{\vec{b} \cdot \vec{u}, f_0\right\}, \quad (4)$$

где $\rho(k)$ – некоторая весовая функция.

При постановке задач синтеза обязательно должны быть учтены условия оптимальной физической и конструктивной реализации. Это, например, требование неотрицательности толщин слоев, условие положительности диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\omega)$ и т. д. Подробное обсуждение математических вопросов, связанных с корректной постановкой задачи синтеза, можно найти в [2].

Задача синтеза многослойных оптических систем в описанной постановке решается, как правило, путем численной минимизации оценочных функционалов. Зависимость функционала G от параметров \vec{u} является весьма сложной – он оказывается многоэкстремальным даже в простейших случаях. Это главная трудность при численном решении задач синтеза на ЭВМ, поэтому очень важно исследовать экстремальные свойства функционала невязки, установить условия достижения им своих минимумов.

Обычно оптические покрытия интерференционного типа являются двухкомпонентными. Показатели преломления чередующихся слоев покрытий в этом случае заданы. Поэтому функционал невязки фактически является функцией N переменных – толщин слоев. Множество Q допустимых векторов $\vec{u} = \{d_1, \dots, d_N\}$ задается условиями неотрицательности толщин слоев и конструктивным требованием ограниченности сверху их общей толщины:

$$\sum_{j=1}^N d_j \leq d_{\max}.$$

При этих условиях задача минимизации G на Q корректна: минимум существует и его поиск устойчив.

Важным неформализованным условием конструктивной реализуемости является требование синтеза покрытия с минимально возможным числом слоев.

Как уже отмечалось, главные трудности численного решения задач синтеза связаны с многоэкстремальностью функционала G . Вследствие этого минимизацию приходится проводить многократно для того, чтобы с большей надежностью найти глобальный минимум.

ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ

Просветляющие покрытия объединяют широкий класс покрытий, служащих для уменьшения отражения света, падающего на границу раздела двух сред. Просветление выполняет двойную роль: увеличивает светопропускание в оптических системах, что особенно важно в случае большого числа преломляющих поверхностей, и уменьшает фоновый свет, возникающий в результате многократного отражения на границах раздела сред [5, 6]. На практике наиболее часто возникает потребность просветления границы оптической среды с воздухом. В этом случае интенсивность отраженного света определяется формулой (5):

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2, \quad (5)$$

где n – показатель преломления среды, на которую свет падает по нормали к поверхности. Нетрудно вычислить, что коэффициент отражения от одной грани оптических стекол, показатель преломления большинства которых находится в интервале 1.45-1.9, будет составлять от 3.5 до 10 % падающего излучения. Коэффициент отражения полупроводниковых материалов, имеющих показатель преломления порядка 3.5, равен ≈ 30 %.

Наиболее простым способом уменьшения коэффициента отражения является нанесение на границу раздела пленки с показателем преломления

меньшим, чем у просветляемого вещества. Коэффициент отражения от системы «подложка – пленка – воздух» на длине волны $\lambda = 4D$ (D – оптическая толщина пленки) равен выражению (6):

$$R = \left(\frac{n_n - n_c}{n_n + n_c} \right)^2, \quad (6)$$

где n_n и n_c – показатели преломления пленки и стекла соответственно. Из (6) следует, что при $n_n \approx n_c^{1/2}$ $R \approx 0$.

На практике получить нулевое отражение можно лишь для материалов с большим показателем преломления. Выполнение этого условия для большинства стекол требует изготовления пленки с показателем преломления 1.2-1.3. Работы в этом направлении ведутся, однако в настоящее время достаточно стабильных слоев с такими показателями преломления не получено. Другим недостатком однослойного просветления является узкая область низкого отражения, в то время как часто возникает задача просветления широкого спектрального диапазона. В работе [7] предлагается использовать для ахроматического просветления простые двух- и трехслойные конструкции на основе четвертьволновых и полуволновых слоев, обеспечивающих зону низкого отражения с $R = 0.4\%$ в диапазоне длин волн от λ_1 до $\lambda_2 \approx 1.6 \lambda_1$ для стекол с показателем преломления 1.46-1.8. покрытия конструировались и изготавливались с целью применения в видимой области спектра. На основе неравнотолщинных слоев (не кратных четвертьволновому слою) можно получить коэффициенты отражения, не превышающие 0.2-0.3 % в видимой части спектра.

В [8] подробно описаны конструкция, технология изготовления и результаты испытания пяти- и семислойных неравнотолщинных просветляющих покрытий из пленок MgF_2 и TiO_2 для стекла марки КВ ($n = 1.52$). покрытие также изготавливалось для видимой области спектра с отношением $\lambda_2:\lambda_1 = 1.6$. Большой интерес представляет попытка разработать ахроматическое просветление с градиентом показателя преломления [9]. Авторами был ис-

пользован тот факт, что выщелачивание пленок, близких по составу к боросиликатному стеклу, приводит к образованию однородного пористого покрытия с низким преломлением. Изготовленное ими на стекле КВ трехслойное покрытие, состоящее из смеси окислов $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, из соединений кремния и из пленки с $n \approx 1.32$, полученной после выщелачивания смеси окислов, позволило получить остаточное отражение $R \approx 0.5 \%$ в области спектра 0.45-1.0 мкм. Существенным недостатком такого покрытия является его низкая механическая прочность.

В отдельных случаях, например, в различных схемах генерации гармоник основного излучения возникает потребность в просветляющих покрытиях, рассчитанных на две длины волны. В [8] показано, что можно получить коэффициенты отражения $R(\lambda_1)$ и $R(\lambda_2)$, не превышающие 0.1-0.3 % и с соотношением $\lambda_2:\lambda_1$ в интервале значений 1.2-2.5 для стекол с различными показателями преломления.

ЗЕРКАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Как видно из названия, этот класс покрытий объединяет интерференционные покрытия, применяемые с целью увеличения коэффициента отражения. Конструктивно они, пожалуй, менее разнообразны, чем просветляющие покрытия. Как правило, зеркала состоят из четвертьволновых или кратных им по толщине чередующихся пленок с высоким и низким показателями преломления. Коэффициент отражения такой стопы зависит от разницы в показателях преломления слоев и их числе и может превышать 99.5 %. Диэлектрические зеркала, имеющие пренебрежимо малый коэффициент поглощения, успешно конкурируют с металлическими зеркалами, у которых поглощение может достигать 25-30 %. Кроме того, многослойные покрытия на основе таких материалов, как тугоплавкие окислы, обладают более высокой химической устойчивостью и механической прочностью по сравнению с широко применяемыми пленками алюминия и серебра.

Определенные трудности встречаются при изготовлении широкополосных зеркал, т. е. зеркал с широкой областью высокого отражения. В этом случае можно использовать набор зеркал, нанесенных на одну подложку со смежными полосами высокого отражения. Недостатком такого метода является необходимость нанесения большого числа слоев. Другой путь изготовления широкополосных зеркал заключается в нанесении большого числа чередующихся слоев, оптическая толщина которых монотонно изменяется по определенному закону. Такие покрытия очень чувствительны к точности нанесения слоев, поэтому при их реализации предъявляются высокие требования к методу контроля их толщины. Некоторого увеличения области высокого отражения можно достичь, увеличивая разницу в показателях преломления слоев, составляющих покрытие, но этот метод ограничен выбором материалов с необходимыми параметрами. Существуют работы, в которых решается проблема расчета и изготовления зеркал, имеющих две области высокого отражения. И если конструирование и реализация большинства описанных покрытий сравнительно несложны, то их применение в качестве зеркал для лазерного резонатора может вызвать значительные трудности. В этом случае к ним предъявляются, кроме высокого отражения, такие требования, как низкие потери (т. е. потери на поглощение и рассеяние света) для лазеров с небольшим коэффициентом усиления, высокая лучевая прочность для мощных лазеров и ряд других требований, которые, в конечном счете, определяют КПД и долговечность лазеров. Эти задачи решаются в каждом конкретном случае выбором материала слоев и оптимальной технологии их нанесения.

Так, например, высокоотражающие покрытия на излучающих гранях полупроводниковых лазеров играют важную роль в уменьшении величины порогового тока накачки. Причем диэлектрические многослойники имеют преимущество перед металлическими зеркалами, т. к. они не разрушаются в процессе пайки кристалла к держателю и не шунтируют *p-n*-переход полупроводниковой структуры. Вследствие этого интерференционные зеркала изготавливают на основе пленок $\text{Si-Al}_2\text{O}_3$, Si-SiO_2 и ZnS-MgF_2 . Но перечислен-

ные конструкции лазерных зеркал также не свободны от недостатков. Пленки Si обладают поглощением на длинах волн менее 1 мкм, а их оптические свойства сильно зависят от условий напыления. Зеркала на основе ZnS-MgF₂, изготовленные для ИК-области спектра, подвержены растрескиванию из-за высоких растягивающих напряжений в пленках MgF₂. Из всего сказанного видно, что выбор той или иной конструкции не всегда однозначен и может явиться непростой технологической задачей.

СВЕТОДЕЛИТЕЛИ

Та часть света, которая не отражается от интерференционного зеркала, беспрепятственно проходит сквозь него, т. к. потери в слоях диэлектрика пренебрежимо малы. Таким образом, зеркало, коэффициент отражения которого менее 100 %, может использоваться как простейшее светоделительное устройство, разделяющее падающее на него излучение на прошедшее и отраженное в определенной пропорции. Конструкции светоделительных покрытий чрезвычайно разнообразны. Они зависят от требований, предъявляемых к светоделителям, – ахроматичности светоделителя (ширины области спектра, в которой излучение делится в заданной пропорции), от угла падения излучения на светоделитель, от отношения прошедшего и отраженного лучей, которое необходимо получить. Отражение света от покрытия под углом, отличным от нормального, приводит к его частичной или полной поляризации. В связи с этим от светоделителей может потребоваться также сохранение поляризации падающего излучения. Такие светоделители называются неполяризующими. Светоделительное покрытие наносится либо на гипотенузную грань одной из призм, и призмы с покрытием и без покрытия склеиваются – «светоделительный кубик», либо на одну или обе стороны плоскопараллельной пластины. Если покрытие наносится на одну сторону пластины, вторую сторону, как правило, просветляют, особенно в случае неполяризующих светоделителей, с целью исключить паразитное отражение на границе «стекло – воздух».

Рассмотрим некоторые конструкции светоделителей подробнее. Хорошо известны трехслойные покрытия, у которых оптическая толщина слоя, прилегающего к подложке, в два раза больше двух других слоев: $P2VHV$, где V и H – высокопреломляющий и низкопреломляющий слои, P – подложка. При показателях преломления $n_V = 2.3-2.4$, $n_H = 1.32-1.38$ и $n_P = 1.5-1.6$, что соответствует, например, покрытию $ZnS-MgF_2$ на стекле КВ, можно получить отношение отраженного R к прошедшему T лучу – $R : T \approx 1$ в области спектра от $\lambda_1 = 0.72\lambda_0$ до $\lambda_2 = 2.3\lambda_1$, где $\lambda_0/4$ – оптическая толщина одного слоя. Отступление R и T от среднего значения в этом случае не превышает 10 %. Более ахроматичные светоделители с отношением $R : T \approx 1$ можно получить, увеличивая число слоев в покрытии. Например, конструкции $P2HVHVH$ и $P2VHVHVHP$ на основе тех же материалов, что и предыдущая конструкция, имеют в области $\lambda_1 \div \lambda_2 = 1.7\lambda_1$ отступление от среднего значения по абсолютной величине 1 и 4 % соответственно. описанные конструкции синтезированы для падения света под углом 45° и без учета поляризации разделяемого излучения. Необходимо отметить, что синтезированные делители такого типа на основе пяти- и девятислойных покрытий, состоящих из слоев неравной оптической толщины, по своим характеристикам близки к описанным выше конструкциям, но значительно сложнее их в изготовлении.

При использовании в волоконной оптике светоделительные покрытия могут наноситься непосредственно на скошенный торец оптического волокна. Потери в такой конструкции составляют 1.5-2.0 дБ. В качестве основных достоинств светоделителей на торце волокна отмечают относительную простоту изготовления, надежность и возможность применения групповой технологии по сравнению со светоделителями, изготовленными по сплавной технологии или методом механической обработки.

ОСЛАБИТЕЛИ

Очень широкий и своеобразный класс оптических элементов, предназначенных для внесения в оптические системы фиксированного или регули-

руемого оптического затухания. Ослабители (аттенюаторы, нейтральные или «серые» фильтры) используются для улучшения условий работы приемников излучения при больших световых потоках, для настройки и регулировки аппаратуры, измерения нелинейности различных фотоэлектрических устройств и т. п. основные требования, предъявляемые к ослабителям, – максимальная зависимость ослабления от характеристик излучения (длины волны, степени поляризации, пространственного распределения, мощности и расходимости), а также от условий и времени эксплуатации.

В настоящее время существует множество типов ослабителей, отличающихся методами ослабления: диафрагмирование луча, применение поляризаторов, рассеивающих и поглощающих сред, использование электрооптических свойств жидких кристаллов и электрохромных свойств пленок оксида ванадия и т. д. Волоконная оптика имеет, кроме того, свои специфические методы ослабления: изменение расстояния между световодами, осевое смещение и микроизгиб световодов. Последние отличаются простотой конструкции и технологичностью, однако в этих методах трудно обеспечить воспроизводимость установки заданных коэффициентов ослабления и нечувствительность к внешним воздействиям. Большое распространение получили плавные ослабители (с непрерывно изменяющимся законом ослабления), изготовленные на основе тонких пленок металла переменной толщины, напыляемых на прозрачные подложки. Полупрозрачные слои металла на прозрачной подложке широко используются также в качестве дискретных ослабителей (имеющих фиксированный коэффициент ослабления). Так, фирма Newport Corporation (США) рекламирует плавные ослабители на основе алюминиевой пленки на подложках в виде диска, коэффициент ослабления которых линейно растет с ростом угла поворота диска и достигает 10 ± 1.5 или 20 ± 2 об. на длине волны 0.63 мкм. Алюминий защищен пленкой SiO_2 , обратная сторона диска просветлена в области 400-700 нм. Аналогичный ослабитель с максимальным коэффициентом ослабления 10 дБ изготавливает фирма Hewlett Packard (США) на область 1200-1650 нм. Предполагается также исполь-

зовать пленки титана и никеля, оптическая плотность которых слабо меняется в видимой и ближней ИК-области спектра.

Своеобразие ослабителей на основе пленок металлов в отличие от перечисленных выше типов оптических элементов заключается в использовании потерь, в частности поглощения в пленках. Интерференционные эффекты вследствие большого поглощения в металлических слоях, как правило, отсутствуют.

ПОЛЯРИЗАТОРЫ

Поляризаторы служат для разделения падающего на них излучения на отраженный и прошедший пучки, поляризованные во взаимноперпендикулярных плоскостях. Интерференционное покрытие состоит из двухкомпонентной системы чередующихся слоев с высоким и низким показателями преломления. Конструктивно поляризаторы подразделяются на призмные и пластинчатые. Призмные состоят из двух склеенных призм, на гипотенузные грани одной или обеих предварительно нанесено интерференционное покрытие. Катетные грани призм при этом обычно просветляют. Принцип работы поляризатора основан на том, что излучение, отраженное под углом от границы раздела двух сред частично поляризуется. Степень поляризации в этом случае зависит от угла падения света и имеется угол, при котором степень поляризации достигает своего максимального значения, – угол Брюстера. Высокой степени поляризации можно добиться, обеспечивая условия, при которых отражение излучения для всех границ раздела в покрытии происходит под углом Брюстера:

$$\varphi_B = \arctg \frac{n_H}{n_B} \quad \text{и} \quad \varphi_H = \arctg \frac{n_B}{n_H},$$

где n_H и n_B – показатели преломления низкопреломляющего и высокопреломляющего слоев соответственно, а φ_H и φ_B – углы отражения на границах раздела слоев. Оптические толщины слоев при этом определяются из выражения:

$$n_i \cdot h_i \cdot \cos \varphi_i = \lambda_0 / 4.$$

Здесь $n_i \cdot h_i$ и φ_i – оптическая толщина i -го слоя и угол, определяющий направление распространения излучения в i -м слое.

С целью получения оптимального поляризационного эффекта показатель преломления материала призм рассчитывается по формуле:

$$n_{II} = \frac{n_B \cdot \sin \varphi_B}{\sin \varphi_{II}} = \frac{n_H \cdot \sin \varphi_H}{\sin \varphi_{II}},$$

где φ_{II} – угол призмы.

При изготовлении призмённых поляризаторов с учетом приведенных расчетов можно получить степень поляризации близкую к 100 % как в прошедшем, так и в отраженном лучах. К достоинствам описанной конструкции относится относительно широкая спектральная область поляризации света, которую можно расширить, нанося на гипотенузные грани интерференционные покрытия со смещенными друг относительно друга областями высокой поляризации, и возможность изготовления поляризаторов с углом между прошедшим и отраженным лучами 90° . Последний параметр может иметь большое значение для упрощения оптических систем с использованием линейно поляризованного света.

Пластинчатый поляризатор представляет собой прозрачную пластинку с нанесенным на нее интерференционным покрытием. Поляризационный эффект при этом достигается за счет разницы в ширине области высокого отражения различных поляризованных составляющих света при определенных углах отражения. При такой конструкции поляризатора можно также добиться высокой степени поляризации, но в более узком спектральном диапазоне по сравнению с призмёнными поляризаторами. Достоинствами в этом случае являются простота конструкции, отсутствие клееных соединений, что позволяет использовать пластинчатые поляризаторы в мощных лазерных системах.

Интерференционные поляризаторы обоих типов успешно конкурируют с кристаллическими поляризаторами и поляроидами благодаря большому светопропусканию и относительной дешевизне. Относительно узкая область

с высокой степенью поляризации и резкая зависимость поляризации от угла падения света на покрытие не имеет существенного значения для монохроматического и узконаправленного лазерного излучения.

ФИЛЬТРЫ

Узкополосные пропускающие интерференционные фильтры (УПИФ) предназначены для выделения из спектра зоны различной ширины, начиная с десятков нанометров и кончая ангстремами. Конструкция фильтрующего покрытия состоит из двух или большего числа зеркал, между которыми находятся разделительные слои. В качестве зеркал могут быть использованы металлические, металлодиэлектрические и диэлектрические зеркала. Последние предпочтительнее, так как позволяют получать большее отражение при меньших потерях. В случае применения диэлектрических зеркал оптическая толщина разделительного слоя h связана с оптической толщиной слоев зеркал соотношением $h = 2p \cdot h'$, где $p = 1, 2, 3 \dots$ - порядок фильтра, а длина волны максимума пропускания фильтра $\lambda_{\max} = 2h / p$. На положение λ_{\max} и другие характеристики фильтров большое влияние оказывают ошибки в толщинах слоев покрытия. Поскольку покрытие фильтра состоит из довольно большого числа слоев, то к способу контроля их толщин в процессе нанесения должны предъявляться высокие требования и изготовление УПИФ является достаточно сложной технологической задачей. Как показали расчеты, у диэлектрических УПИФ коэффициент поглощения на длине волны λ_{\max} в 10^2 - 10^4 раз больше, чем у зеркал с эквивалентной толщиной. Поэтому даже при небольших коэффициентах поглощения материалов слоев ($\chi = 0.0002$) суммарное поглощение в фильтре может достигать 20-40 %. Это накладывает дополнительные ограничения на материалы, на основе которых конструируется фильтр, и на технологические режимы их изготовления, так как от них зависят потери в слоях (поглощение и рассеяние).

Одной из проблем, возникающих в процессе производства и при эксплуатации фильтров, является нестабильность их оптических характеристик

во времени. Это обусловлено главным образом необратимыми структурными изменениями в покрытии и заполнением микропор слоев водой. Поэтому для получения стабильных фильтров применяется их герметизация путем припекания защитного стекла, что также необходимо учитывать при выборе материалов слоев покрытия.

Узкополосные фильтры часто применяются в сочетании с длинноволновым и коротковолновым отрезающими фильтрами – спектроделителями. Они обладают высоким пропусканием в заданном интервале спектра и высоким отражением в прилегающей к нему длинноволновой или коротковолновой области соответственно. Коротковолновые отрезающие фильтры обычно имеют вид:

ПВНВ...НВ0.5Н или *П2ВН2ВН...2ВН2В*,

а длинноволновые:

П0.5ВНВ...НВН0.5В.

Область минимального пропускания отрезающих фильтров таких конструкций относительно невелика. Она может быть расширена за счет изготовления нескольких фильтров со смежными областями высокого отражения или за счет использования материалов с селективным пропусканием. Представляет интерес конструкция фильтра, синтезированная из четвертьволновых слоев. Такое покрытие может служить как коротковолновым, так и длинноволновым отрезающим фильтром.

Существуют неравнотолщинные конструкции, позволяющие увеличить область высокого пропускания спектроделителей. Однако такие покрытия значительно сложнее в реализации и их спектральные характеристики очень сильно зависят от точности, с которой наносятся составляющие покрытие слои.

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Корректирующие фильтры предназначены для коррекции спектра источников или преемников излучения и используются в различных областях оптики. Основным недостатком излучения является существенная зависи-

мость чувствительности от длины волны света, что приводит к большим погрешностям при измерении мощности оптического излучения. причем спектральные чувствительности различных типов фотоприемников могут существенным образом отличаться друг от друга. Сильно различаются также спектральные характеристики различных источников излучения. Вследствие многообразия источников и приемников излучения и требований, предъявляемых к их спектральным характеристикам не существует каких-нибудь общих рекомендаций по созданию корректирующих фильтров. Дополнительным источником искажений спектра может служить селективность среды, в которой распространяется излучение. Так, предлагается использовать цветное стекло для получения более контрастных снимков в подводной фотографии. В этом случае корректируется селективное поглощение морской воды. Для коррекции спектральных характеристик источников излучения в фотометрии и цветном телевидении предлагается использовать интерференционное покрытие, выполненное из слоя трехсернистой сурьмы и расположенного на подложке в виде отдельных участков. При этом учитывается также селективное поглощение в слое Sb_2S_3 .

Для коррекции спектральной чувствительности германиевого фотодиода в некоторой области длин волн можно использовать цветное стекло. В результате селективность системы «фотодиод – корректирующий фильтр» уменьшится в этой области до 10 %. Лучших результатов можно достичь применяя интерференционные покрытия. Коррекцию спектральной чувствительности кремниевого фотодиода проводила фирма «Аидо» (Япония) при изготовлении датчиков типа AQ-1928, которые служат для измерения оптической мощности.

ВОПРОСЫ

1. Понятие многослойного оптического интерференционного покрытия.
2. Закономерности поведения световой волны на границе двух сред.
3. Интерференция в тонких пленках.
4. Формулы Френеля.
5. Многослойная оптическая система.
6. Методы анализа многослойных оптических покрытий.
7. Синтез оптических покрытий.
8. Оптические покрытия элементов волоконной оптики.
9. Просветляющие покрытия.
10. Зеркальные покрытия.
11. Светоделители.
12. Ослабители.
13. Поляризаторы.
14. Интерференционные светофильтры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М., Вольф Э. основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
2. Тихонравов А.В. Синтез слоистых сред. – М.: Знание, 1987.
3. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. – Л.: Машиностроение, 1977. – 264 с.
4. Тихонов А.И., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986.
5. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
6. Кокс Дж.Т., Хасс Г. Просветляющие покрытия для видимой и инфракрасной областей спектра // В кн.: Физика тонких пленок. – Т. 2. – М.: Мир, 1967. – С. 186-253.
7. Введенский В.Д., Метельников А.А., Фурман Ш.А. Ахроматические просветляющие покрытия для материалов с показателем преломления 1.46-1.8 // Оптико-механическая промышленность. – 1980. – N 3. – С. 32.
8. Т.Я. Колодный, Е.А. Левчук, Ю.Д. Порядин, П.П. Яковлев // Электронная промышленность. – 1981. – В. 5-6. – С. 93-101.
9. Бохонская И.В., Крылова Т.Н. Ахроматические просветляющие покрытия с градиентом показателя преломления для широкой области спектра // Оптико-механическая промышленность. – 1986. – N 6. – С. 34.

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ
МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
(Лабораторная работа)

Составители:

Машин Александр Иванович

Ершов Алексей Валентинович

Компьютерный набор, рисунки и верстка И.А. Карабановой

Подписано к печати _____ Формат 60×84 1/16

Печать офсетная. Бумага оберточная. Усл. печ. л. 1.3

Тираж 150 экз. Заказ _____.

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, 603950
ГСП-20, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23

Типография ННГУ, 603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37
