

## Лабораторная работа № 10

### Определение материальных потерь в пленочных световодах

*Цель работы* – расчет коэффициента экстинкции для пленочного световода с использованием значений его оптических постоянных, измеренных с помощью интерференционного метода; определение толщины световода.

Появление лазеров, особенно полупроводниковых, вызвало быстрое развитие интегральной оптики [29] – нового научно-технического направления, связанного с обработкой больших объемов информации. В волоконно-оптических системах связи интегрально-оптические устройства используются для преобразования оптических сигналов, их частотной селекции и уплотнения сигналов в каналах связи.

Конструктивной основой любого интегрально-оптического устройства является тонкопленочный оптический волновод (световод). Простейший световод представляет собой слой вещества, нанесенный на подложку из материала с меньшим показателем преломления. Покровным слоем для такого световода, как правило, служит воздух. Толщины оптических волноводов обычно лежат в интервале от 0,1 мкм до 10 мкм. Чтобы оптическое излучение удерживалось в волноводе, его показатель преломления  $n$  должен быть больше показателей преломления подложки  $n_1$  и покровного слоя  $n_0$ :  $n > n_1$ ,  $n > n_0$ .

Материалов, пригодных для создания интегрально-оптических структур, очень много. Это прозрачные кварцевые стекла (применяемые в видимой области спектра), халькогенидные стеклообразные полупроводники (инфракрасное излучение), полимеры и многие другие вещества. Обязательное требование к материалам волновода, подложки и покровного слоя – высокая прозрачность в рабочем спектральном диапазоне. Практически приемлемым считаются световоды, оптические потери в которых не превышают 1 – 3 дБ/см. Потери в тонкопленочном световоде связаны с поглощением и рассеянием света в объеме и на поверхности, а также с излучением световой энергии в подложку и покровный слой. Чтобы избежать сильного ослабления света вследствие межзонного поглощения, рабочая длина волны должна удовлетворять условию

$$\lambda [\text{мкм}] > 1,24/\Delta W [\text{эВ}],$$

где  $\Delta W$  – ширина запрещенной зоны материала волноводного слоя.

Для изготовления плоских (планарных) волноводов применяют различные методы, в том числе заимствованные из технологии приборостроения и полупроводниковой микроэлектроники. Совершенные пленки с контролем толщины можно получать нанесением нужного материала на под-

ложку в вакуумной камере при его термическом, катодном или ионно-лучевом распылении.

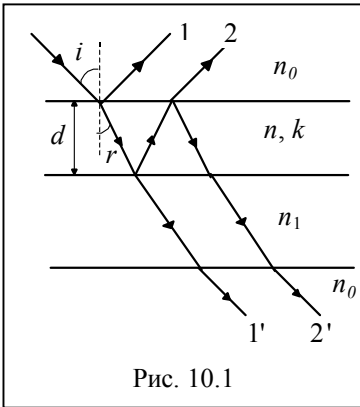
Прозрачные тонкие пленки используются не только в интегрально-оптических волноводах. Многослойные тонкопленочные системы широко применяются в качестве просветляющих покрытий, поляризаторов, оптических фильтров и т.п.

Одним из важных эксплуатационных параметров пленочного световода является коэффициент ослабления (см. лаб. работу №4). Его значение определяется различными механизмами (рассеяние, потери на излучение и т.д.), среди которых основное место занимают материальные потери, характеризующиеся *коэффициентом экстинкции*

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \tag{1}$$

где  $k$  – показатель поглощения пленки;  $\lambda$  – длина волны падающего света.

В этом состоит одна из причин, по которым при создании тонкопленочных структур необходимо точно знать оптические постоянные каждой пленки (показатель преломления  $n$  и показатель поглощения  $k$ ) и толщину пленок  $d$ . Для определения этих величин обычно применяют методы неразрушающего оптического контроля, в том числе основанные на измерении коэффициентов пропускания и отражения.



Пропускание тонкой пленки в первую очередь зависит от показателя поглощения ее материала. Однако оно в значительной степени определяется также процессом многократного отражения света от границ пленки, приводящим к явлению интерференции. На рис. 10.1 схематически показано возникновение интерференции в прозрачной слабопоглощающей пленке толщиной  $d$  с показателями преломления  $n$  и поглощения  $k$ , нанесенной на прозрачную подложку с показателем преломления  $n_1$  ( $n > n_1$ ,  $n \gg k$ ).

Падающий свет частично отражается от верхней поверхности пленки, образуя пучок 1, частично же преломляется. Пройдящий внутрь пленки свет в свою очередь испытывает частичное отражение от нижней ее поверхности; возникающий при этом пучок, после преломления на верхней поверхности пленки, образует пучок 2. Поскольку при каждом прохождении света через границы раздела пленка-воздух и пленка-подложка возникают отраженные внутри пленки световые пучки, то

описанный процесс может быть достаточно сложным. Однако, если отражающие способности этих границ раздела не очень велики, то интерференция будет иметь место в основном между первыми двумя отраженными (1 и 2) или первыми двумя прошедшими (1' и 2') пучками. Если выполняется условие

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad (2)$$

то в отраженном свете будут наблюдаться интерференционные максимумы, в случае, когда справедливо равенство

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2} = (2m + 1)\lambda \quad (3)$$

– интерференционные минимумы. В формулах (2) и (3)  $m = 1, 2, \dots$  – целые числа (порядки интерференции). В проходящем свете условия максимумов и минимумов меняются местами.

Из соотношений (2) и (3) следует, что, если пленку освещать светом, содержащим волны разных длин, то длины волн интерференционных экстремумов зависят от показателя преломления пленки и ее толщины. Поэтому, по интерференционной картине, наблюдаемой в спектрах пропускания (отражения), можно определить оптические постоянные пленки и ее толщину.

#### Методика выполнения работы

Используемый в данной работе метод, предложенный в [30], не требует сложной специальной аппаратуры: для измерений можно использовать обычный спектрофотометр, работающий в необходимом диапазоне длин волн. Его немаловажным преимуществом является также возможность определения оптических постоянных пленки по измерению только коэффициента пропускания пленки  $T$ , или только коэффициента отражения  $R$ , тогда как большинство соответствующих методик требуют экспериментального нахождения обеих этих величин.

В случае малого поглощения ( $k \ll n$ ), коэффициент пропускания пленки определяется соотношением

$$T = \frac{16n_1 n^2 \eta n_0}{c_1^2 + c_2^2 \eta^2 + 2c_1 c_2 \eta \cos \frac{4\pi n d}{\lambda}}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \eta &= \exp\left(-\frac{4\pi k d}{\lambda}\right); \\ c_1 &= (n + n_0)(n_1 + n); \\ c_2 &= (n - n_0)(n_1 - n); \end{aligned} \quad (5)$$

$n$ ,  $n_0$  и  $n_1$  – показатели преломления пленки, окружающей среды и подложки, соответственно. Из выражения (5) следует, что величина  $\eta$  связана с показателем поглощения  $k$  соотношением

$$k = -\frac{\lambda \ln \eta}{4\pi d}. \quad (6)$$

Из формулы (4) вытекает, что коэффициент пропускания  $T$  является периодической функцией  $d/\lambda$ .

На рис. 10.2 сплошной кривой изображен график функции  $T(\lambda)$ . В отсутствие дисперсии вещества пленки ( $n$  и  $k$  не зависят от  $\lambda$ ) и постоянной ее толщины ( $d = \text{const}$ ) на нем будут наблюдаться интерференционные экстремумы при длинах волн, удовлетворяющих условию

$$\frac{4\pi n d}{\lambda} = m\pi. \quad (7)$$

При четных значениях целых чисел ( $m = 0, 2, \dots$ ) имеют место максимумы функции  $T(\lambda)$ , а при нечетных ( $m = 1, 3, \dots$ ) – ее минимумы. Соответствующие «экстремальные» значения коэффициента пропускания равны

$$T_{\max} = \frac{16n_1 n^2 \eta n_0}{(c_1 + c_2 \eta)^2}, \quad (8)$$

$$T_{\min} = \frac{16n_1 n^2 \eta n_0}{(c_1 - c_2 \eta)^2}. \quad (9)$$

Если дисперсия оптических характеристик пленки невелика ( $|dn/d\lambda| \ll 1, |dk/d\lambda| \ll 1$ , то формулы (8) и (9) можно рассматривать как уравнения кривых, на которых лежат точки интерференционных максимумов и минимумов («оггибающие» максимумов и минимумов – пунктирные кривые на рис. 10.2), а условие (7) определяет положения точек касания графика  $T(\lambda)$  с этими кривыми.

С учетом отражения света от границы подложка–воздух выражение для показателя преломления пленки  $n$ , соответствующее некоторому  $m$ -ому длинноволновому минимуму на экспериментальном графике коэффициента пропускания  $T(\lambda)$ , имеет вид [30]:

$$n = B + \sqrt{B^2 - n_1} \quad (10)$$

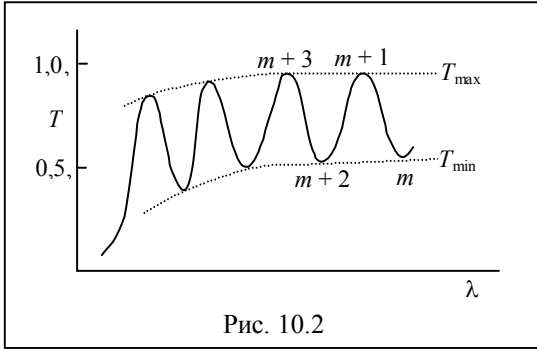


Рис. 10.2

где

$$B = \frac{n_0 + n_1}{2(1 + T'_{\max})} \left( T'_{\max} - 1 + 2 \sqrt{\frac{T'_{\max}}{T'_{\min}}} \right),$$

$T'_{\min}$  – коэффициент пропускания, измеренный на длине волны  $\lambda_m$ , соответствующей этому минимуму;  $T'_{\max}$  – значение коэффициента пропускания, соответствующее точке пересечения прямой  $\lambda = \lambda_m$  с верхней огибающей графика  $T(\lambda)$ . Интерференционный порядок  $m$  экстремума определяется формулой

$$m = \frac{2\lambda_{m+2}}{\lambda_m - \lambda_{m+2}}, \quad (11)$$

где  $\lambda_m$  и  $\lambda_{m+2}$  – длины волн двух соседних минимумов.

После определения показателя преломления пленки  $n$ , величина  $\eta$  может быть найдена путем численного решения квадратного уравнения

$$\frac{T'_{\max}}{2(n_0^2 + n_1^2) - T'_{\max}(n_0 - n_1)^2} = \frac{4n^2\eta}{(c_1 + c_2\eta)^2}. \quad (12)$$

Перепишем соотношение (7) в виде:

$$n = \frac{m\lambda}{4d}. \quad (13)$$

Если на экспериментальной кривой  $T(\lambda)$  укладывается достаточно большое число максимумов и минимумов, то после определения толщины пленки  $d$  формулу (13) можно использовать для нахождения зависимости показателя преломления  $n$  от длины волны (дисперсионную кривую  $n(\lambda)$ ).

Для вычисления толщины пленки  $d$  следует использовать формулу (7), подставляя в нее значения  $\lambda_m$  и  $n$ , соответствующие  $m$ -ому длинноволновому минимуму, а значение показателя поглощения  $k$  даст формула (6).

Описанный метод определения дисперсии оптических констант и толщины пленки по спектру пропускания пригоден, если толщина пленки достаточна велика и в спектре пропускания в области прозрачности наблюдается несколько интерференционных экстремумов, позволяющих провести огибающие  $T_{\max}(\lambda)$  и  $T_{\min}(\lambda)$ . Модель, положенная в основу метода, предполагает однородность исследуемых образцов по толщине, отсутствие в них светорассеяния и слабое поглощение. Погрешность этого метода определяется точностью нахождения  $T'_{\min}$  и для обычных полупроводниковых слоев ( $2 < n < 4$ ) не превышает 2% для показателей преломления.

Спектрофотометр СФ – 26, используемый в данной работе, рассчитан для измерения коэффициента пропускания исследуемого образца  $T$  в диапазоне длин волн от 0,2 мкм до 1,2 мкм. При этом [31] коэффициент

пропускания находится как отношение интенсивности излучения  $I$ , прошедшего через измеряемый образец (пленка на подложке), к интенсивности излучения  $I_0$ , прошедшего через контрольный образец (чистая подложка, коэффициент пропускания которой принимается за единицу). Это позволяет исключить влияние на результат поглощения и многократных отражений в подложке. Отсчет пропускания производится по «точкам» для определенных длин волн с помощью стрелочного прибора.

#### Порядок выполнения работы

1. Установить контрольный образец (чистую подложку) и исследуемый образец (пленку на подложке) образцы в измерительную кювету так, чтобы поток излучения можно было пропускать через них поочередно.
2. Ввести контрольный образец в монохроматический поток излучения. Регулируя ширину щели, установить стрелку прибора на деление «100». Значение интенсивности установившегося при этом светового потока принять за 100% пропускания.
3. Ввести в поток излучения исследуемый образец. Стрелка прибора отклонится при этом пропорционально изменению интенсивности потока. Зафиксировать по шкале величину коэффициента пропускания.
4. Произвести измерения п.п.2 и 3 для различных длин волн в интервале, указанном преподавателем.
5. Построить график зависимости оптического пропускания пленки от длины волны  $T(\lambda)$ . Провести огибающие экстремумов пропускания.
6. Определить показатель преломления пленки для самого длинноволнового минимума по формуле (10) (известные значения  $n_0$  и  $n_1$  указывает преподаватель).
7. Определить порядок этого минимума по формуле (11). Полученное значение округлить до ближайшего целого.
8. Найти толщину пленки по формуле (7)
9. С помощью формулы (13) найти показатели преломления для длин волн, соответствующих точкам соприкосновения огибающих с графиком  $T(\lambda)$ , и построить дисперсионную кривую  $n(\lambda)$ .
10. Определить  $\eta(\lambda)$  из уравнения (12).
11. Зная  $\eta(\lambda)$  и  $d$  по формуле (6) вычислить  $k(\lambda)$  для длин волн каждого экстремума.
12. Построить график зависимости  $k(\lambda)$ . Используя полученный график и соотношение (1), найти коэффициент экстинкции пленочного световода  $\alpha$  на заданной преподавателем длине волны.