# 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

В этом разделе мы рассмотрим методы измерения важнейших характеристик оптических волноводов — показателей преломления волноводных мод, профиля показателя преломления градиентных, затухания волноводных мод.

## 6.1 Измерение эффективных показателей преломления волноводных мод

Для измерения эффективных показателей преломления волноводных мод $n_m$ планарных волноводов удобно применять призменный метод ввода (рис. 6.1).

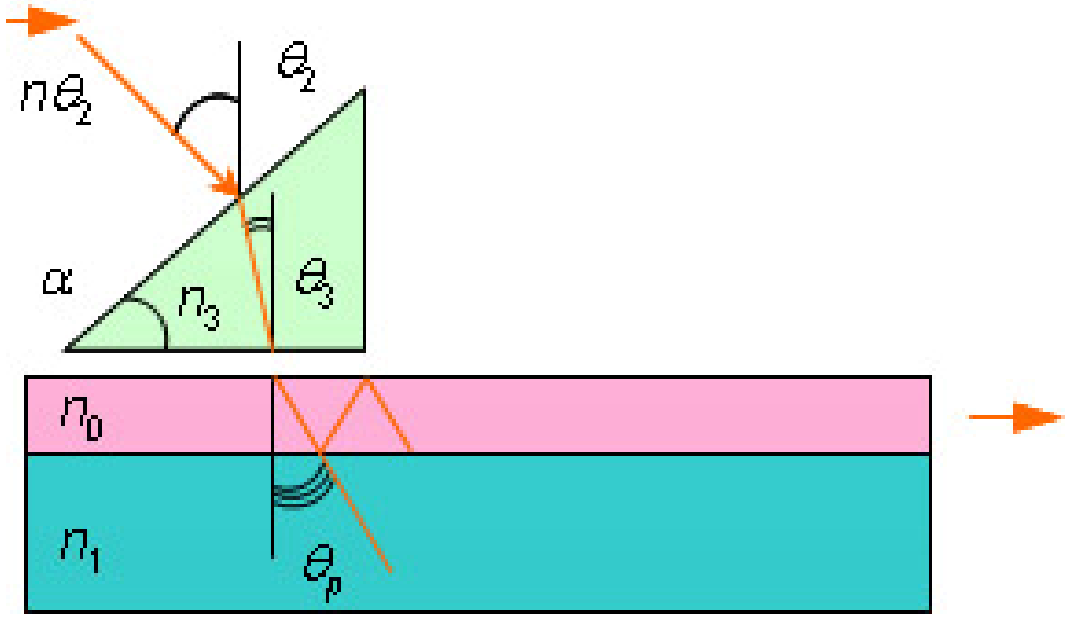



Рис. 6.1. Призменный метод ввода света в волновод

Как мы установили ранее, в пленке возбуждается р-я волноводная мода, если угол $\theta_3$ удовлетворяет соотношению (5.1):

$$n_0 \cdot \sin\theta_p = n_3 \cdot \sin\theta_3 = n_m.$$

Выражая угол $\theta_3$ через угол $\theta_2$ — угол падения светового луча на входную грань призмы, легко получить:

$$n_m = n_3 \cdot \sin\left[\alpha + \arcsin\left(\frac{\sin\theta_2}{n_3}\right)\right], \qquad (6.1)$$

причем положительным считается угол $\theta_2$, когда луч отклонен от нормали $\bar{n}$ к основанию призмы (на рис. 6.1 — $\theta_2 < 0$), а $\alpha$ — угол у основания призмы.

Для измерения углов ввода волновод с призмой устанавливается обычно на столе оптического гониометра (например, гониометра-спектрометра ГС-6 и ему подобных). Точность измерения углов $\theta_2$ на таком гониометре составляет несколько угловых секунд, поэтому этот метод позволяет измерять $n_m$ с точностью до $10^{-5}$. Естественно, что $n_3$ и $\alpha$ тоже должны быть известны с такой точностью. Регистрацию введенной моды можно осуществлять визуально, по треку, или с помощью фотоприемника. В случае пленочного волновода фотоприемник помещают вблизи выводной призмы, а для диффузионного удобно помещать его вблизи торца подложки с волноводом. В последнем случае можно также определить показатель преломления подложки, поскольку при некотором угле $\theta_2$, когда левая часть (6.1) будет равна $n_1$, преломленный луч будет распространяться в подложке под углом $\theta_1 = 90^o$ (точно под поверхностью).

## 6.2 Измерение показателя преломления материала пленки и толщины тонкопленочных волноводов

Показатели преломления $n_m$ различных волноводных мод подчиняются дисперсионному уравнению (2.3.7) для тонкопленочного волновода:

$$\frac{2\pi \cdot h}{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{n_0^2 - n_m^2}}\left\{\pi\rho + \operatorname{arctg}\left[\left(\frac{n_0}{n_1}\right)^{\chi} \cdot \sqrt{\frac{n_m^2 - n_1^2}{n_0^2 - n_m^2}}\right] + \operatorname{arctg}\left[\left(\frac{n_0}{n_2}\right)^{\chi} \cdot \sqrt{\frac{n_m^2 - n_2^2}{n_0^2 - n_m^2}}\right]\right\}.$$

Если известны показатели преломления хотя бы двух волноводных мод, например, $TE_0$ и $TE_1$, а также $n_1$ и $n_2$, то составляя систему уравнений с двумя неизвестными — $n_0$ и $h$, по значениям $n_{m1}$ и $n_{m2}$ мы можем определить как эффективный показатель преломления материала пленки $n_0$, так и толщину волновода $h$.

Обычно расчет проводится численным методом. Для этого можно исключить из системы $\frac{h}{\lambda}$, и в полученное уравнение с требуемым шагом (исходя из заданной точности) подставлять различные значения $n_0$. Можно пользоваться и другими методами численного решения уравнений, например, итерационными. После вычисления $n_0$ вычисляется из (2.3.7) толщина пленки $h$. Точность измерения $n_0$ может достигать $10^{-5}$, а $h$ — $10^{-3}$ от абсолютной величины.

Заметим, что в некоторых случаях на точность измерения $n_m$ в системе подложка — пленка — покровный среда может повлиять призма ввода (т.к. фактически $n_m$ измеряется для системы подложка — пленка — зазор — призма). Как правило, влиянием призмы пренебрегают, поскольку вносимая ею ошибка обычно невелика (меньше, чем связанная с ошибками измерения).

## 6.3 Измерение затухания в волноводе

Для измерения затухания волноводных мод применяют методы рассеянного и прошедшего света. В методе рассеянного света измеряется свет, рассеянный неоднородностями в волноводе, с помощью фотоприемника с диафрагмой. Этот фотоприемник двигается вдоль поверхности волновода вблизи от нее. Примерный вид зависимости интенсивности рассеяния от расстояния изображен на рисунке 6.2.

Поскольку центры рассеяния распределены вдоль пленки неравномерно и имеют разную «эффективную поверхность рассеяния», требуется статистическая обработка результатов измерения, например, по методу наименьших квадратов. Иногда затухание света в волноводе столь велико, что длина трека не превышает нескольких миллиметров. В этом случае трек можно сфотографировать и фотопленку профотометрировать на микрофотометре.

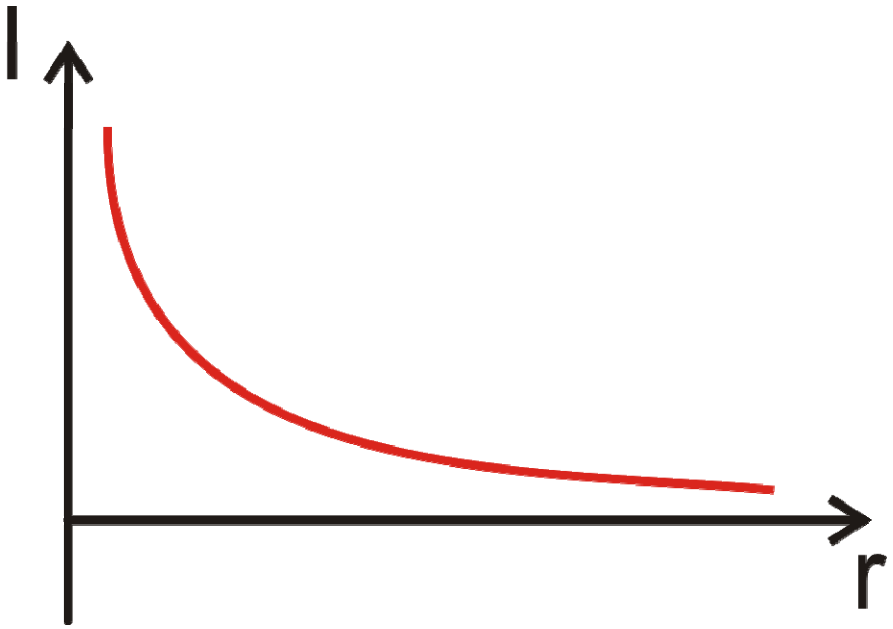



Рис. 6.2. Зависимость интенсивности рассеяния от расстояния

В методе прошедшего света сравниваются интенсивность света при различных положениях выводной призмы. К сожалению, при перестановке призмы условия ввода и вывода могут изменяться, что приводит к значительным экспериментальным ошибкам.

Потенциально точность измерения затухания может составлять сотые доли дБ/см. На практике недостатки экспериментальной установки не позволяют измерить затухание $\alpha < 1$ дБ/см.