

- [3] Островский Л.А. - ЖЭТФ, 1968, т. 54, № 4, с. 1235-1243.
- [4] Mestdagh D., Haelterman M. - Optics Commun., 1987, v. 61, N 4, p. 291-295.
- [5] Bloembergen N. - Optics. Commun., 1973, v. 8, N 4, p. 285-288.
- [6] Арутюнян С.Г., Рухадзе А.А. - Физика плазмы, 1979, т. 5, № 3, с. 702-704.

Институт прикладной физики
АН СССР, Горький

Поступило в Редакцию
12 июня 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 18 26 сентября 1988 г.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Э.А. Арутюнян, С.Х. Галоян,
С.П. Погосян

Разработка простых и надежных методов определения параметров оптических волноводов со ступенчатым видом профиля показателя преломления (ППП) является важной задачей интегральной оптики в связи с широким использованием в технологии изготовления волноводных структур методов высокочастотного распыления, эпитаксиального выращивания и ионного облучения. Как известно, наиболее прецизионное определение характеристик тонких пленок связано с решением системы трансцендентных дисперсионных уравнений волновода. Однако этот путь является весьма трудоемким, т.к. требует использование ЭВМ.

Целью данной работы является получение приближенных аналитических выражений, с помощью которых можно быстро и с достаточной для практических задач точностью определить параметры тонкопленочных структур, причем предлагаемый метод применим при минимальном числе резонансных мод $M=2$.

Характеристическое уравнение для m -й моды тонкопленочного волновода имеет вид [1]:

$$kh(n_f^2 - n_m^2)^{1/2} = \Phi_{cm} + \Phi_{sm} + m\pi, \quad (1)$$

где $(m=0, 1, 2 \dots M-1)$,

$$2\Phi_{cm} = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{n_m^2 - 1}{n_f^2 - n_m^2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$2\Phi_{sm} = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{n_m^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_m^2} \right)^{1/2}$$

есть фазовые скачки ТЕ-волны на верхней и нижней границах планарного непогруженного волновода ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ - длина волны света в вакууме, h - толщина волновода, n_f - показатель преломления несущего слоя, n_m - эффективный показатель преломления m -й моды).

Если принять величины фазовых скачков равными [2, 3]

$$2\Phi_{cm} = 2\Phi_{sm} \approx \pi, \quad (3)$$

что является достаточно удовлетворительным приближением для мод низших порядков, то из системы уравнений (1) для мод волновода с $m = 0.1$ получим:

$$\left(\frac{n_f^2 - n_1^2}{n_f^2 - n_0^2} \right)^{1/2} = 2, \quad (4)$$

откуда можно определить n_f :

$$n_f = \left(\frac{4n_0^2 - n_1^2}{3} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Однако расчеты показывают, что в рамках этого приближения удовлетворительные результаты можно получить лишь для многомодовых волноводов с $M \geq 4$. Это связано с тем, что при уменьшении числа мод волновода условие (3) становится менее корректным. Особенно это справедливо для величины фазового скачка на нижней границе волновода ($2\Phi_{sm}$), где разность показателей преломления пленки и подложки меньше.

Более точный метод для быстрого расчета параметров тонкопленочных волноводов, предлагаемый в данной работе, основан на следующих допущениях. Применяется приближение, которое из рассмотрения модового спектра представляется достаточно обоснованным:

$$n_{M-1}^2 - n_s^2 \approx n_f^2 - n_0^2, \quad (6)$$

где n_{M-1} - эффективный показатель преломления последней моды волновода.

С учетом (6) из системы характеристических уравнений (1) для мод $m = 0$ и 1 вместо (4) можно получить:

$$\eta = \left(\frac{n_f^2 - n_1^2}{n_f^2 - n_0^2} \right)^{1/2} = \frac{\frac{3\pi}{2} + \arctg \left(\frac{n_0^2 + 2n_1^2 - 3n_{M-1}^2}{4(n_0^2 - n_1^2)} \right)^{1/2}}{\frac{\pi}{2} + \arctg \left(\frac{4n_0^2 - n_1^2 - 3n_{M-1}^2}{n_0^2 - n_1^2} \right)^{1/2}}. \quad (7)$$

Как показывают оценки, из всех параметров волновода n_f наименее чувствительно к варьированию величин скачков фаз, поэтому в правой части (7) вместо n_f в нулевом приближении подставлено выражение (5). Теперь из (7) можно получить новое выражение для n_f :

$$n_f = \left(\frac{\gamma^2 n_0^2 - n_1^2}{\gamma^2 - 1} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Заметим, что подстановка значения $\gamma = 2$ в (8) дает формулу (5). Для наглядного сравнения формул (5) и (8) найдем новые значения γ для двухмодового волновода. Принимая в (7) $n_{M-1} = n_1$, получим:

$$\gamma = \frac{\frac{3\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{1}{2}}{\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} 2} \approx 1.932839. \quad (9)$$

Для нахождения параметров n_s и h из физических соображений целесообразно определить h с помощью характеристического уравнения (1) для нулевой моды, а n_s — из характеристического уравнения (1) для последней моды. В результате получим:

$$h = \frac{\operatorname{arctg} \left(\frac{n_0^2 - 1}{n_f^2 - n_0^2} \right)^{1/2} + \operatorname{arctg} \left(\frac{n_0^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_0^2} \right)^{1/2}}{k(n_f^2 - n_0^2)^{1/2}} \quad (10)$$

$$n_s^2 = n_{M-1}^2 - (n_f^2 - n_{M-1}^2) \operatorname{tg}^2 \left[k(n_f^2 - n_{M-1}^2)^{1/2} h - \operatorname{arctg} \left(\frac{n_{M-1}^2 - 1}{n_f^2 - n_{M-1}^2} \right)^{1/2} - \pi(M-1) \right]. \quad (11)$$

Используем метод последовательных приближений и в качестве нулевого приближения примем $n_s^{(0)} \approx n_{M-1}$. Подставляя это значение в (10), определим соответствующую величину $h^{(0)}$. Поскольку $n_s < n_{M-1}$, то имеем $h^{(0)} < h$. Далее, подставляя значение $h^{(0)}$ в (11), найдем следующее приближение $n_s^{(1)}$. Очевидно также, что $n_{M-1} > n_s^{(1)} > n_s$. Подставляя новое значение $n_s^{(1)}$ в (10), определим $h^{(1)}$; соответственно имеем: $h^{(0)} < h^{(1)} < h$. Такую процедуру можно повторять многократно и получать все более точные значения для параметров n_s и h . Однако оценки показывают, что на практике достаточно ограничиться третьим шагом (до получения $n_s^{(2)}$ и $h^{(2)}$), т.к. при этом точность расчета параметров становится сравнимой с экспериментальной точностью измерения модового спектра волновода.

В заключение для иллюстрации рассчитаем параметры n_f , n_s и h двухмодового тонкопленочного волновода, в котором ожидаются наибольшие отклонения полученных результатов в рамках приближения работ [2, 3] и предлагаемого метода.

Точные значения параметров тонкопленочного волновода (n_f, n_s, h)	Эффективные показатели преломления (n_m)	Расчетные значения параметров волновода в соответствии с приближением работ [2, 3]	Расчетные значения параметров волновода по методу настоящей работы
$n_f = 1.83000$ $n_s = 1.79000$ $h = 1.50000$	$n_0 = 1.82131$ $n_1 = 1.79910$	$n_f = 1.82945$ $n_s = 1.77988$ $h = 1.90716$	$n_f = 1.83017$ $n_s = 1.79301$ $h = 1.47142$

Результаты, приведенные в таблице, наглядно показывают преимущество вышеизложенного метода.

Таким образом, изложенная в данной работе процедура нахождения n_f, n_s и h с помощью решения системы уравнений (8), (9), (10) и (11) обеспечивает достаточную для практики точность как для многомодовых, так и для маломодовых (с $M = 2$) волноводов и может служить надежным методом для быстрого определения параметров тонкопленочных волноводов со ступенчатым видом ППП.

Л и т е р а т у р а

- [1] Интегральная оптика / Под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1973. 344 с.
- [2] Charter G.H., Jausaud P.C. - J. Appl. Phys., 1978, v. 49, N 2, p. 917-919.
- [3] Арутюнян Э.А., Галоян С.Х., Ильин В.В., Лебедев Л.С., Морозов В.В., Назарова В.Я. Квантовая электроника, 1985, т. 12, № 8, с. 1763-1765.

Институт физических исследований
АН Арм.ССР, Аштарак

Поступило в Редакцию
8 июля 1988 г.