Изв. АН Арминской ССР, Физика, 16, 191-195 (1981)

ЭФФЕКТИВНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ С ПЕРЕХОДНЫМ СЛОЕМ

С. Г. ГРИГОРЯН, А. Г. САРКИСЯН

Предложены безразмерные параметры для характеристики диэлектрических волноводов с переходным слоем. Выполнен расчет эффективных волноводных показателей преломления (ЭВПП) в зависимости от этих параметров. Предложен простой метод расчета ЭВПП волноводов с узким (по сравнению с толщиной волновода) переходным слоем.

Определение эффективных волноводных показателей преломления (ЭВПП) и количества мод плоского диэлектрического волновода с заданным распределением показателя преломления эквивалентно решению задачи об определении энергетических уровней частицы в потенциальной яме [1, 2]. Решения задач подобного типа используются как для нахождения области применения волноводов в интегральной оптике, так и для восстановления профиля распределения показателя преломления (метод неразрушающего контроля выращиваемых структур) по измеренным значениям ЭВПП [2].

В настоящей работе рассматривается задача об определении ЭВПП волноводов, характеризующихся наличием переходного слоя между подложкой и пленкой (служащей, собственно, волноводом). Подобное распределение имеет место в волноводах (рис. 1), изготовляемых методами эпи-



Рис. 1. Распределение показателя преломления в волноводе с переходным слоем. Ось X нормальна к поверхности волновода. Начало отсчета совпадает с границей волновод-покрытие. Z и L — соответственно безразмерные толщины участка с постоянным распределением показателя преломления и переходного слоя (в единицах длины волны каналируемого света), n_c , n_f , n_s — показатели преломления покрытия, пленки (служащей волноводом) и подложки.

таксии, а также некоторыми другими методами [3]. Волноводы, имеющие распределение показателя преломления, подобное приведенному на рис. 1, удсбно характеризовать двумя условиями: $L \gg 1$ и $L/Z \ll 1$, где L — безразмерная толщина переходного слоя, Z — безразмерная толщина участка с постоянным показателем преломления (L и Z измеряются в единицах

191

длины волны каналируемого света). Отметим, что оба типа волноводов не являются взаимно исключающими, поскольку первое условие $(L \gg 1)$ требует, чтобы толщина переходного слоя была гораздо больше длины волны, а второе условие не зависит от длины волны и означает лишь малость толщины переходного слоя по сравнению с толщиной участка с постоянным показателем преломления. Рассмотрим отдельно эти случаи.

1. $L \gg 1$. Известно, что асимметричные волноводы без переходного слоя (например, диффузионные, для которых $Z \equiv 0$) характеризуются двумя типами нормализованных параметров: нормализованной толщиной и нормализованными ЭВПП [4]. В рассматриваемом нами случае естественно ввести еще и третий параметр — нормализованную толщину переходного слоя. Действительно, уравнение ВКБ (возможность применения которого обусловлена малостью длины волны по сравнению с толщиной переходного слоя) для волновода типа изображенного на рис. 1 принимает вид

$$2 V_0 \sqrt{1-b} + 2 V_1 \int_0^{x_1} \sqrt{f(x) - b} \, dx = 2 m\pi + \frac{3}{2} \pi.$$
 (1)

Величины V₀ + V₁ и V₁ назовем, соответственно, нормализованной толщиной волновода и нормализованной толщиной переходного слоя, поскольку

$$V_0 + V_1 = 2 \pi (Z + L) \sqrt{n_f^2 - n_s^2}, V_1 = 2 \pi L \sqrt{n_f^2 - n_s^2}.$$

Остальные обозначения в (1) являются общепринятыми: $f(X) - \phi$ ункция, описывающая распределение показателя преломления переходного слоя, m — номер моды, $b_m = \frac{N_m^2 - n_s^2}{n_f - n_s^2}$ — нормализованные ЭВПП *m*-ой моды, X_t определяется из соотношения $f(X_t) = b_m$, X — безразмерная координата, измеряемая в единицах длины волны каналируемого излучения. При выводе (1) использовалось обычное приближение для асимметричных волеоводов: $n_f - n_s \ll n_s$. Ураенение (1) справедливо как для TE, так и для TM-мод, с той только разницей, что при подстановке величин $n_f \bowtie n_s$ (для анизотропных материалов) следует учитывать направление вектора поляризации.

Для определения нормализованных ЭВПП (b_m) из уравнения (1) н ЭВПП (N_m) для прямоугольного волновода (см. раздел 2) были составлены алгоритм и программа для ЭЦВМ ЕС-10-20 на алгоритмическом языке «Фортран». Результаты численного решения уравнения (1) относительно нормализованных ЭВПП для различных комбинаций V_0 , V_1 и f(X)приведены на рис. 2—4 и могут быть использованы для определения профиля распределения показателя преломления по экспериментально измеренным значениям ЭВПП.

2. L/Z ≪ 1. Мы уже отметили выше, что приведенное неравенство означает лишь узость переходного слоя по сравнению с толщиной участка с постоянным распределением коэффициента преломления (или по срав-

нению с общей толщиной волновода, поскольку из условия $L/Z \ll 1$ следует $L/(L+Z) \ll 1$). Следовательно, оно справедливо как для волноводов с $L \gg 1$ (толщина переходного слоя гораздо больше длины волны, но мень-



Рис. 2. Нормализованные ЭВПП для волноводов с $f(X) = \exp(-X^2)$. $V_0 + V_1$ — нормализованная толщина волновода, V_0 — нормализованная толщина участка с постоянным распределением показателя преломления, X — безразмерная текущая координата (в единицах длины волны каналируемого света). Указаны номер моды (слева) и нормализованная толщина переходного слоя V_1 для 4-ой моды (у остальных мод набор V_1 тот же). Вверху справа указаны номера мод.

Рис. 3. Нормализованные ЭВПП для волноводов с $f(X) = \exp(-X)$.

ше толщины волновода), так и для волноводов с $L \lesssim 1$ (толщина переходного слоя сравнима с длиной волны или меньше ее и в то же время мала по сравнению с толщиной яолновода). Поэтому предлагаемый ниже метод расчета ЭВПП для волноводов с $L/Z \ll 1$ справедлив также и в том случае, когда метод ВКБ не применим (а именно, $L/Z \ll 1$ и $L \lesssim 1$). Вместе с тем для волноводов с $L \gg 1$ и $L/Z \ll 1$ (толщина переходного слоя велика по сравнению с длиной волны, но мала по сравнению с толщиной волны, расчета эвпина переходного слоя велика по сравнению с длиной волны, но мала по сравнению с толщиной волновода) можно применять оба метода. В таблице приведены результаты расчета эвпП такого волновода обоими методами.

Предлагаемый нами метод расчета ЭВПП для волноводов с $L/Z \ll 1$ использует отмеченную в самом начале аналогию в решениях задачи на собственные значения для частицы в потенциальной яме и задачи определения ЭВПП волновода. Продолжая эту аналогию, можно легко показать, что приближенные значения ЭВПП для волновода, изображенного на рис. 1, можно найти из точных значений ЭВПП для прямоугольного волновода (пунктир на рис. 1). Для этого достаточно рассмотреть разность собственных значений задач о волноводах с переходным слоем и без него



Рис. 4. Нормализованные ЭВПП для волноводов с $f(X) = \frac{1}{2} [1 + \cos(\pi X)].$

как поправку к точному решению задачи о прямоугольном волноводе. Тогда поправки первого порядка ΔN_m к точным решениям можно определить по формулам квантовомеханической теории возмущений, не зависящим от времени [1], в соответствии с которой и выбран параметр малости L/Z:

$$\Delta N_m = -\frac{2n_f \int_0^L \Delta n(X) \cos^2(x_f X - \varphi_s) \, dx}{N_m \, h_{abbb}}$$

где Δn (X) — разность показателей преломления «невозмущенного» и «возмущенного» волноводов, N_m — невозмущенный ЭВПП m-ой моды, $k = 2\pi/\lambda$ (λ — длина волны каналируемого излучения), $h_{s\phi\phi}$ — эффективная толщина волновода [4], X — безразмерная координата (в единицах длины волны), нормальная к поверхности волновода,

$$\varphi_s = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{N_m^2 - n_s^2}}{\sqrt{n_f^2 - N_m^2}}, \ x_f^2 = n_f^2 k^2 - N_m^2 k^2.$$

В таблице приведены результаты расчета ЭВПП методами ВКБ и теории возмущений для волновода с косинусоидальным распределением показателя преломления в переходной области.

Расчет проводился для эпитаксиальной структуры, граничащей с воздухом ($n_c = 1$), с подложкой из $LiTaO_1$ ($n_s = 2,1823$) и пленкой из

	Эффективные волноводные пока- затели преломления	
	ВКБ	Теория возмущений
0	2,204	2,204
1	2,204	2,203
2	2,202	2,202
3	2,200	2,199
4	2,198	2,198
	and the second s	

Tahama

LiNBO₃ ($n_f = 2,2047, Z = 26, L = 3$). Такие структуры описаны в работе [5]. ЭВПП для «невозмущенного» волновода определялись путем численного решения соответствующего точного дисперсионного уравнения для собственных значений, приведенного в [4]. Из таблицы видно хорошее согласие результатов расчета разными методами (рассматриваемый волновод допускает применение обоих методов по причинам, рассмотренным в начале этого раздела).

НИИ физики конденсированных сред ЕГУ

Поступила 7. VIII. 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Квантовая механика, М., 1948.

2. B. Hocker, W. K. Burns. IEEE, QE-11, 270 (1975).

3. J. E. Goell, R. D. Standley. Appl. Opt., 11, 2502 (1972).

4. H. Kogelnik, V. Ramaswamy. Appl. Opt., 13, 1857 (1974).

5. О. А. Хачатурян, Р. С. Мадоян. Электронная техника, сер. 6, вып. 4, 41 (1978).

էՖԵԿՏԻՎ ԱԼԻՔԱՏԱՐԱՅԻՆ ԲԵԿՄԱՆ ՑՈՒՑԻՉՆԵՐԸ ԱՆՑՈՂԱԿԱՆ ՇԵՐՏ ՈՒՆԵՑՈՂ ԴԻԷԼԵԿՏՐԻԿ ԱԼԻՔԱՏԱՐՆԵՐՈՒՄ

Ս. Գ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա. Գ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

Առաջարկված են նորմալացրած պարամետրեր անցողական շերտ ունեցող դիէլեկտրիկ ալիջատարները ընութադրելու համար։ Կատարված է էֆեկտիվ ալիջատարային բեկման ցուցիչների հաշվարկ։ Ալիջատարի ընդհանուր հաստության հետ համեմատած նեղ անցողակաչ շերտ ունեցող ալիջատարների համար առաջարկված է էֆեկտիվ ալիջատարային բեկման ցուցիչների հաշվարկի հեշտ մեթոդ։

EFFECTIVE MODE INDICES IN DIELECTRIC WAVEGUIDES WITH TRANSMISSION REGION

S. G. GRIGORYAN, A. G. SARKISYAN

Normalized parmeters describing waveguides with a transmission region are proposed. The effective mode indeces in waveguides are calculated depending on these parameters. A simple calculational method for obtaining the effective mode indices of waveguides with narrow transmission regions (in comparison with the waveguide thickness) is proposed.