

5. Fang S., Torres-Verdin C., Guo-zhong G. A New Approximation for 3D Electromagnetic Scattering in the Presence of Anisotropic Conductive Media – 3DEMIII Workshop, February, 2003.
6. Greengard L., Rokhlin V. A Fast Algorithm for Particle Simulations – Journal of Computational Physics 135, 1997.
7. Labretuche C. A Convergence theorem for the multipole method for 2 dimensional scattering problems. *Matematizing of Computation*. Vol. 67. No 222. April, 1998.
8. Coifman R., Rokhlin V. The Fast Multipole Method for Electromagnetic Scattering Calculations – *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.* № 4. January. 1993.
9. Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems. PWS Publishing Company, 1996.
10. Cai-Cheng Lu, Chew W.C., Multilevel Fast Multipole Algorithm for Electromagnetic Scattering by Large Complex Objects. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.* Vol. 45. №. 10. October. 1997, 1998.
11. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигнала. М., 1987.
12. Anderson C.R. "An implementation of the fast multipole method without multipoles," *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* Vol. 13. №. 4. Apr. 1992.
13. Костарев И.С. Решение СЛАУ итерационными методами // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Научная сессия ТУСУР-2005» (26–28 апреля 2005 г.)*. Томск, 2005.
14. Костарев И.С., Куксенко С.П. Увеличение скорости решения СЛАУ с помощью быстрого преобразования Фурье // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Научная сессия ТУСУР-2005» (26–28 апреля 2005 г.)*. Томск, 2005.

УДК 535.3:621.391.63

М.Н. Фролова

ПЛАНАРНЫЕ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ВОЛНОВОД С ПАРАБОЛИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

В настоящее время важную роль в устройствах интегральной оптики играют многослойные структуры, использующие волноводное распространение света [1, р. 1397–1413; 2, с. 1555–1559; 3, с. 305–310]. Многие технологические методы получения волноводов – диффузия примесей, ионный обмен в кристаллах ниобата и танталата лития, а также жидкофазная эпитаксия для кристаллов силленитов – приводят к формированию градиентных волноводов, характеризующихся плавным изменением показателя преломления по их толщине [2–3; 4, с. 103–108; 5, с. 80–82]. Профиль показателя преломления, то есть закон изменения $\Delta n(z)$, является одной из важнейших характеристик оптических волноводов, поскольку он определяет их модовый состав и распределение светового поля, которые должны приниматься во внимание при проектировании интегрально-оптических схем и их элементов. Важное преимущество использования технологий получения градиентных и многослойных волноводов в оптических устройствах состоит в том, что имеется возможность управления параметрами волноводных и изолирующих слоев. Так, например, технология получения кристаллов со структурой силленитов и их слоев путем изменения состава позволяет варьировать фундаментальные оптические и хирооптические

характеристики: спектры отражения, дисперсию показателя преломления, оптическое вращение [6, с. 356–380].

Целью данной статьи является рассмотрение методики описания многослойных структур со слоями с практически важными профилями показателя преломления.

Некоторые технологические методы получения волноводов, такие как нанесение эпитаксиальных слоев $\text{Vt}_{12}\text{TiO}_{20}$ методами кристаллизации из раствора в расплаве и кристаллизацией из ограниченного объема, описанные в [6], приводят к тому, что новый кристаллический слой с показателем преломления n_0 формируется не сразу. На границе с подложкой возникают переходные слои с промежуточными параметрами решетки. Эти переходные слои имеют плавный профиль показателя преломления, который может быть аппроксимирован асимметричной параболической функцией (рис. 1, *a*) или комбинацией прямого участка и параболы (рис. 1, *b*), в зависимости от результатов операции шлифования поверхности. Параболическое распределение показателя преломления является наиболее подходящей функцией для этих целей, поскольку для нее имеется аналитическое решение волнового уравнения, кроме того, ее параметры легко изменять, вплоть до ступенчатой

функции показателя преломления. Степень крутизны параболической функции может изменяться, так же как и значения показателя преломления волноводного слоя, которые принимаются равными n_0 и n_s на границах с покровной средой и подложкой соответственно. Показатель преломления покровной среды, расположенной при $z < 0$, во всех случаях принимался равным n_1 .

При создании активных оптических устройств возникает потребность использования светочувствительных слоев или подложек, показатель преломления которых n_3 может превышать показатель преломления волноводного слоя. В этом случае необходимы дополнительные изолирующие слои (рис. 1, в). Так, например, для создания интегрально-оптических детекторов в качестве подложки берется монокристаллический кремний ($n_3 = 3.85$), изолирующий слой из двуокиси кремния ($n_2 = 1.46$) и оксидные волноводы, максимум показателя преломления которых имеет порядок $n_0 = 2.8$ [7, с. 11–12]. При использовании в качестве подложек кристаллов ниобата лития такие буферные слои могут быть сформированы ионной бомбардировкой, описанной в работе [8, р. 151–156].

Для описания распространения света в рассматриваемых волноводных структурах с изолирующим слоем рассмотрим следующее распределение показателя преломления:

$$n(z) = \begin{cases} n_1, & z < 0 \\ n_0 \left(1 - \Delta \frac{z^2}{z_p^2}\right), & 0 \leq z < h \\ n_2, & h \leq z < h + \Delta_h \\ n_3, & h + \Delta_h \leq z \end{cases}, \quad (1)$$

где Δ_h – толщина изолирующего слоя с показателем преломления n_2 , меньшим, чем показатель преломления волноводного слоя на границе с покровной средой n_0 ; n_3 – показатель преломления подложки.

Поперечное распределение поля TE_m -моды с номером $m = 0, 1, 2, \dots$ для планарного градиентного волновода удовлетворяет волновому уравнению [1]

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} + (k^2 n^2(z) - \beta^2) E_y = 0, \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор, $\beta = k n_m$ – постоянная распространения волноводной моды.

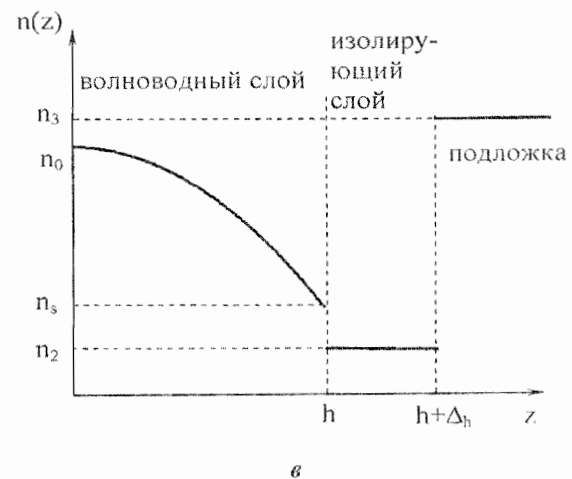
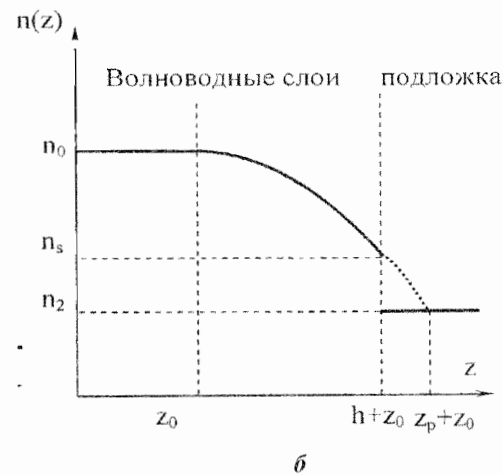
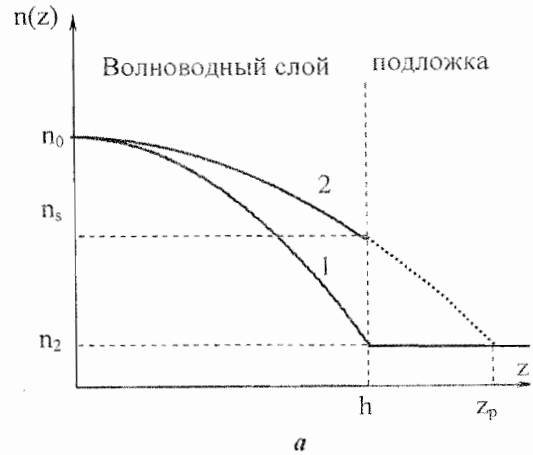


Рис. 1. Волноводные структуры на подложке, содержащие слой с параболическим профилем показателя преломления: а – трехслойная структура, где волноводный слой имеет асимметричный (1) или усеченный (2) параболический профиль показателя преломления; б – четырехслойная структура, содержащая волноводный слой с постоянным показателем преломления толщиной z_0 и переходный слой с усеченным параболическим профилем показателя преломления толщиной h ; в – четырехслойная структура, содержащая волноводный слой с усеченным параболическим профилем показателя преломления и изолирующий слой толщиной Δ_h .

Заменой переменных это уравнение приводится к виду:

$$\frac{d^2 E_y}{d\xi^2} - \left(\frac{\xi^2}{4} + a \right) E_y = 0, \quad (3)$$

где $\xi = z \sqrt{\frac{2n_0 k \sqrt{2\Delta}}{z_0}}$, $a = -\frac{k(n_0^2 - n_m^2)z_0}{2n_0 \sqrt{2\Delta}}$,

E_y – волновая функция, описывающая распределение электрического поля в волноводном слое.

В этом случае решение волнового уравнения (3) берется в виде линейной комбинации функций Куммера [9]:

$$E_y(\xi) = C_1 e^{-\xi^{2/4}} M\left(\frac{a}{2} + \frac{1}{4}; \frac{1}{2}; \frac{\xi^2}{2}\right) + C_2 \xi e^{-\xi^{2/4}} M\left(\frac{a}{2} + \frac{3}{4}; \frac{3}{2}; \frac{\xi^2}{2}\right). \quad (4)$$

Взятая в таком виде волновая функция удовлетворяет условиям непрерывности на границах волновода ($z = 0$ и $z = h$) и условию затухания поля при $z \rightarrow \infty$. Используя известные решения для покровной среды, изолирующего слоя и подложки и сшивая тангенциальные составляющие полей на границах, получаем дисперсионное уравнение четырехслойного волновода с асимметричным усеченным параболическим профилем показателя преломления:

$$P_2 P_2^* \left[\begin{aligned} & M\left(\frac{a}{2} + \frac{1}{4}; \frac{1}{2}; \frac{h^2}{2}\right) + \\ & + P_1^2 h M\left(\frac{a}{2} + \frac{3}{4}; \frac{3}{2}; \frac{h^2}{2}\right) \end{aligned} \right] \cdot \left(e^{P_2 \Delta h + i\delta_{32}} - e^{-P_2 \Delta h - i\delta_{32}} \right) + \left\{ \frac{h^2}{2} M\left(\frac{a}{2} + \frac{1}{4}; \frac{1}{2}; \frac{h^2}{2}\right) + \left(a + \frac{1}{2}\right) h M\left(\frac{a}{2} + \frac{3}{4}; \frac{3}{2}; \frac{h^2}{2}\right) + P_1^2 \left[\left(1 - \frac{h^2}{2}\right) M\left(\frac{a}{2} + \frac{3}{4}; \frac{3}{2}; \frac{h^2}{2}\right) + \left(\frac{a}{3} + \frac{1}{2}\right) h^2 M\left(\frac{a}{2} + \frac{7}{4}; \frac{5}{2}; \frac{h^2}{2}\right) \right] \right\} P_2 \left(e^{P_2 \Delta h + i\delta_{32}} - e^{-P_2 \Delta h - i\delta_{32}} \right) = 0 \quad (5)$$

где $p_1 = k\sqrt{n_1^2 - n_m^{*2}}$ – постоянные распространения света в среде с показателем преломления n_1 ; $p_2^* = k\sqrt{n_m^{*2} - n_2^2}$ – постоянная распространения света в изолирующем слое; $\delta_{ij} = \arctg(p_i/p_j)$ и $n_m^* = n_{m1}^* + in_{m2}^*$ – комплексный эффективный показатель преломления волноводной моды.

В общем случае значения эффективного показателя преломления являются комплексными числами, мнимая часть которых описывает затухание света в волноводе, обусловленное проникновением полей волноводных мод через изолирующий слой в подложку, где и происходят потери энергии или детектирование оптического сигнала [10].

При достаточно большой толщине изолирующего слоя, когда поле волноводной моды не проникает в подложку, мнимая составляющая эффективного показателя преломления стремится к нулю, и уравнение (2) переходит в дисперсионное уравнение для трехслойной структуры, полученное в работе [11].

При увеличении скачка показателя преломления на границе с подложкой параболическое распределение показателя преломления переходит в ступенчатое и уравнение (5) упрощается:

$$\sin(p_1 h + \delta_{10} + \delta_{12}) = \sin(p_1 h + \delta_{10} - \delta_{12}) \exp(-p_2 \Delta - 2i\delta_{31}) \quad (6)$$

Уравнение (6) было также получено в работе [12], однако его анализа не было проведено. В данной работе рассматривается нахождение комплексных корней этого дисперсионного уравнения, для этой цели используется метод последовательных приближений. В нулевом приближении считается, что толщина буферного слоя велика ($\Delta \rightarrow \infty$) и находится значение n_{m0}^* . В первом приближении показатель преломления задавался в форме $n_m^* = n_{m0}^* + \delta n_m^*$, где поправка к нулевому приближению считается малой, $|\delta n_m^*| \ll n_{m0}^*$. В пренебрежении членами второго порядка малости, пропорциональными $(\delta n_m^*)^2$, было получено следующее аналитическое выражение для поправки:

$$\delta n_m^* = \frac{-\sin\left(\left(2\arctg\frac{\gamma_{20}}{\chi_{10}}\right)\right)\exp\left(2i\arctg\frac{\gamma_{20}}{\chi_{10}}\right)\exp\left(-2\gamma_{20}\Delta\right)\frac{\chi_{10}}{k_0^2 n_{m0}^*}}{h_{эф}^{-i}\left[h_{эф} + \frac{1}{\gamma_{00}} - \frac{1}{\gamma_{20}}\left(1 + \frac{2\chi_{10}}{\chi_{30}} + 2i\chi_{10}\Delta\right)\right]}\sin\left(2\arctg\frac{\gamma_{20}}{\chi_{10}}\right)\exp\left(2i\arctg\frac{\gamma_{20}}{\chi_{10}}\right)\exp\left(-2\gamma_{20}\Delta\right) \quad (7)$$

где $\chi_{j0} = k(n_j^2 - n_{m0}^2)$ – поперечные постоянные распространения для слоев с номерами $j = 1$ и $\chi_{j0} = -i\gamma_{j0} = -ik(n_{m0}^2 - n_j^2)$ для $j = 0, 2, 3$.

На основе уравнения (6) и соотношения (7) был проведен анализ распространения света в планарных волноводах, изготовленных ионной имплантацией He^+ и комбинированным протонным обменом с диффузией меди в Y-срез $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ [13].

При проектировании интегрально-оптических устройств требования к параметрам

изолирующего слоя могут быть противоречивы: он должен без потерь передавать волноводное излучение на одних участках подложки и обеспечивать эффективное поглощение этого излучения в фоточувствительной области. Уравнение (5), полученное в данной работе, является обобщающим и позволяет проводить расчет модового состава и распределение светового поля в многослойных планарных волноводных структурах, имеющих неоднородное распределение показателя преломления в широком диапазоне его параметров.

Литература

1. Tamir T., Bertoni H.L. Lateral displacement of optical beams at multilayered and periodic structures // J.Opt. Soc. Amer. 1971. V. 61.
2. Абусев В.М., Леонов Е.И., Липовский А.А., Никитина И.П., Хабаров С.Э., Хоха Л.Г. Исследование оптических волноводных структур на основе монокристаллических пленок силленитов // Письма в ЖТФ. 1988. 14. № 17.
3. Панькин В.Г., Петухов С.Н., Пчелкин В.Ю. и др. Исследование волноводов, полученных диффузией титана на Y-срезе мета-ниобата лития // Квантовая электроника. 1978. № 2.
4. Зилинг К.К., Покровский Л.Д., Шашкин В.В., Шпилова Д.П. Связь профилей показателя преломления с кинетикой диффузии титана в планарных волноводах на LiNbO_3 // Автометрия. 1978. № 1.
5. Войтенков И.Г. Некоторые свойства волноводных слоев в ниобате лития, полученных термодиффузией железа // Весті Академії наук БССР. Сер. физ.-мат. 1980. № 1.
6. Буров В.И., Егорышева А.В., Каргин Ю.Ф. Оптические и хирооптические свойства кристаллов со структурой силленита // Кристаллография. 2001. Т. 46. № 2.
7. Фролова М.Н., Сергеев А.Н., Осадчев Л.А. Распределение показателя преломления в оксидных пленках на основе TiO_2 / Оптико-механическая промышленность. 1987. №3.
8. Kostritskii S.M. and Moretti P. Comparative study of defects induced by proton and helium implantation in LiNbO_3 crystal // Radiat. Eff. 1998. V. 150.
9. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М., 1979.
10. Быковский Ю.А., Кульчин Ю.Н. Исследование потерь световой мощности в тонкопленочном волноводе на подложке из кремния // Изв. вузов, Радиофизика. 1980. № 1.
11. Фролова М.Н., Шандаров С.М., Сергеев А.Н., Осадчев Л.А. Определение параметров асимметричных параболических волноводов // Изв. вузов. Физика. 1987. XXX. № 10.
12. Иткин И.И., Морозов А.Г., Шандаров С.М. Исследование тонкопленочных оптических волноводов из нитрида кремния на кремниевых подложках // Известия вузов. Радиофизика. XXXI. 1988. № 4.
13. Larionov Yu.M., Frolova M.N., Shandarov S.M., Kostritski S.M. Diffraction effects in copper-doped helium-implanted LiNbO_3 waveguide // OSA Trends in Optics and Photonics (TOPS) Vol. 80, Nonlinear Guided Waves and Their Applications, OSA Technical Digest, Postconference Edition (Optical Society of America, Washington DC, 2001).