

УДК 621.383

РАСЧЕТ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

*С. Г. Бондаренко¹, М. М. Векшин², О. А. Кулиш³, Е. Б. Хотнянская⁴,
Н. А. Яковенко⁵*

SIMULATION OF POLARIZATION PROPERTIES OF INTEGRATED-OPTIC WAVEGUIDES

Bondarenko S. G., Vekshin M. M., Kulish O. A., Khotnyanskaya E. B., Yakovenko N. A.

A numerical calculation of polarization properties of arbitrary integrated-optic waveguides used in ecology control optical sensors has been carried out.

1. Влияние поляризационных свойств оптических микроволноводов на характеристики сенсорных оптических устройств

Интегрально-оптические датчики химико-биологических реагентов интерферометрического типа представляют собой двухлучевые интерферометры Юнга и Маха-Цендера, в которых на выходном торце интегрально-оптической схемы формируется интерференционная картина [1].

Создание компактной сенсорной системы предполагает стыковку интегральной схемы с источником оптического излучения через волоконно-оптический световод. Однако стандартное одномодовое волокно не поддерживает плоскость поляризации световой волны, то есть данная величина хаотично меняется с течением времени. Поэтому сенсорное устройство должно быть работоспособно при

произвольной поляризации оптического излучения — ТЕ-, ТМ-поляризации или любого их сочетания. Наглядность интерференционной картины, определяющая чувствительность сенсорных устройств, зависит от модового двулучепреломления, которое характеризует анизотропные свойства волноведущей структуры.

В настоящей работе проведена теоретическая оценка величины модового двулучепреломления интегрально-оптических волноводов различных технологий и построены распределения модовых полей.

2. Методика полного векторного электродинамического анализа интегрально-оптических волноводов

Для точного определения модового двулучепреломления оптических каналных трех-

¹Бондаренко Сергей Григорьевич, аспирант кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

²Векшин Михаил Михайлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

³Кулиш Ольга Александровна, аспирант кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

⁴Хотнянская Елена Борисовна, старший преподаватель кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

⁵Яковенко Николай Андреевич, д-р техн. наук, профессор кафедры оптоэлектроники, декан физико-технического факультета Кубанского государственного университета.

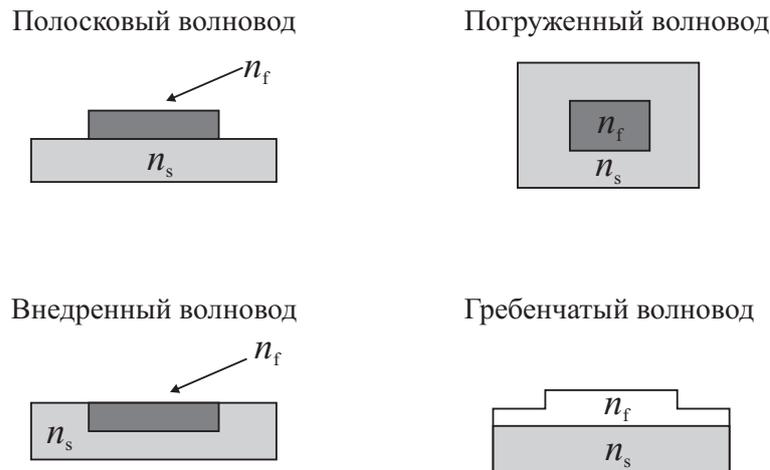


Рис. 1. Типы волноводов интегральной оптики.
 n_f и n_s — показатели преломления волноведущего слоя и подложки

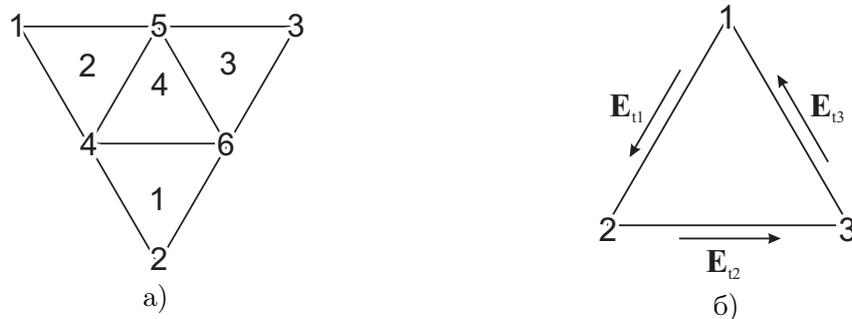


Рис. 2.

a — глобальная нумерация элементов и узлов для введения тангенциальных элементов,
б — тангенциальные составляющие электрического поля в пределах элемента

мерных волноводов общего вида (рис. 1) необходимо использовать полный векторный анализ. В последние годы разработан ряд универсальных методик расчета световедущих каналов путем прямого решения векторного волнового уравнения [2–5]. В настоящей работе была использована методика конечно-элементного анализа с применением специальных тангенциальных элементов [4, 5], позволяющая подавить ложные решения, возникающие при классическом конечно-элементном анализе.

Уравнения Максвелла эквивалентны волновому уравнению для напряженности \mathbf{E} электрического поля в неоднородных немагнитных средах

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 n^2 \mathbf{E} = 0, \quad (2.1)$$

где $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0$, k_0 — волновой вектор вакуума, n — показатель преломления среды, ω —

частота излучения, μ_0 — магнитная проницаемость, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. Если профиль показателя преломления волновода не меняется вдоль волновода, то при решении векторного волнового уравнения считается, что зависимость электрического поля по координате z имеет гармоническую форму — направленная волна имеет фиксированную константу распространения β .

Согласно общим принципам конечно-элементного анализа, расчетная область подвергается элементарной триангуляции (рис. 2а). Вектор \mathbf{E} разлагается на продольную \mathbf{E}_z и поперечную \mathbf{E}_t составляющие, соответственно параллельную и перпендикулярную оси волновода. В узлах, соответствующих вершинам треугольного элемента, рассматривается только \mathbf{E}_z составляющая, вдоль сторон треугольника задаются тангенциальные составляющие \mathbf{E}_t вектора напряженности

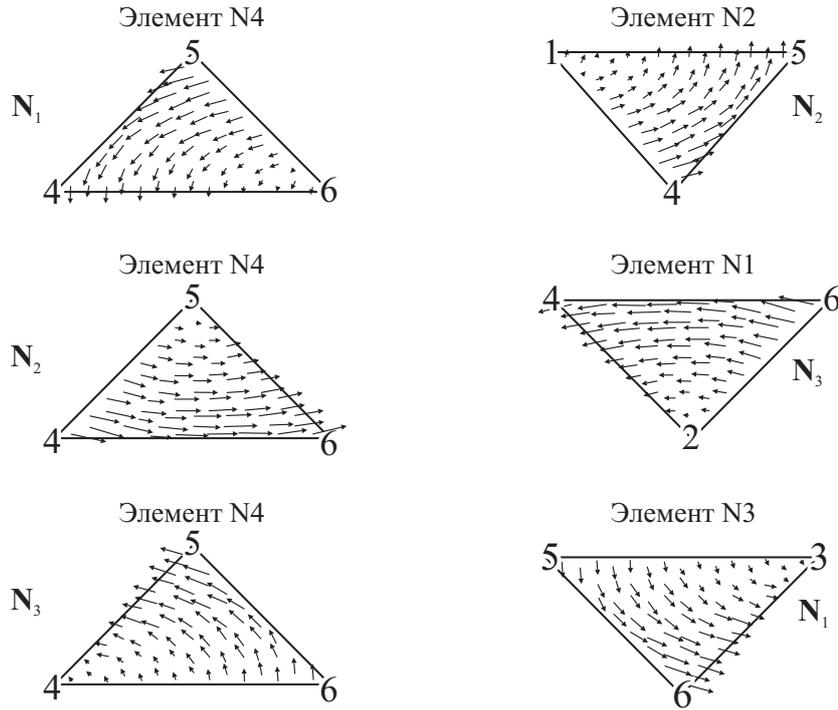


Рис. 3. Силовые линии поля, описываемого функциями формы в соответствии с рис. 2а

Модовое двулучепреломление основных типов стандартных волноводов интегральной оптики

	Погруженный волновод с симметричным профилем ($\Delta n = 0, 01$)	Канальный волновод внедренный в приповерхностную область ($\Delta n = 0, 01$)	Гребенчатый волновод ($\Delta n = 0, 1$)	Полосковый волновод ($\Delta n = 0, 1$)
$N_{TE} - N_{TM}$	$1, 2 \cdot 10^{-6}$	$2, 1 \cdot 10^{-4}$	0,004	0,04

электрического поля (рис. 2б). Тогда решение уравнения (2.1) можно представить в виде

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{E}(x, y)e^{-i\beta z} = \left[\mathbf{E}_t(x, y) + zE_z(x, y) \right] e^{-i\beta z},$$

$$E_z = |\mathbf{E}_z|.$$

На каждом конечном элементе разбиения вводятся обозначения для компонент поля

$$\mathbf{e}_t = i\beta \mathbf{E}_t, \quad e_z = E_z.$$

Такая подстановка необходима для получения задачи на собственные значения.

Функции e_z и \mathbf{e}_t аппроксимируются на каждом элементе разбиения полиномами вида

$$\mathbf{e}_t^{(e)}(x, y) = \sum_{j=1}^3 e_{tj} \mathbf{N}_j(x, y),$$

$$e_z^{(e)}(x, y) = \sum_{j=1}^3 e_{zj} N_j(x, y),$$

где функции N_j представляют собой стандартные базисные функции первого порядка. Вид векторов \mathbf{N}_j задается уравнениями

$$\mathbf{N}_1 = l_1(N_1 \nabla N_2 - N_2 \nabla N_1),$$

$$\mathbf{N}_2 = l_2(N_2 \nabla N_3 - N_3 \nabla N_2),$$

$$\mathbf{N}_3 = l_3(N_3 \nabla N_1 - N_1 \nabla N_3),$$

$l_i = \sqrt{b_k^2 + c_k^2}$ — длина ребра треугольника, $k = 1, 2, 3$. Если ввести единичные вектора вдоль сторон треугольных элементов \mathbf{e}_i , направленные от вершины i к вершине j , то $(\mathbf{N}_i, \mathbf{e}_i) = 1$. Это означает, что функция \mathbf{N}_i имеет вдоль одной из сторон треугольника постоянную ненулевую тангенциальную составляющую, тогда как вдоль двух других сторон

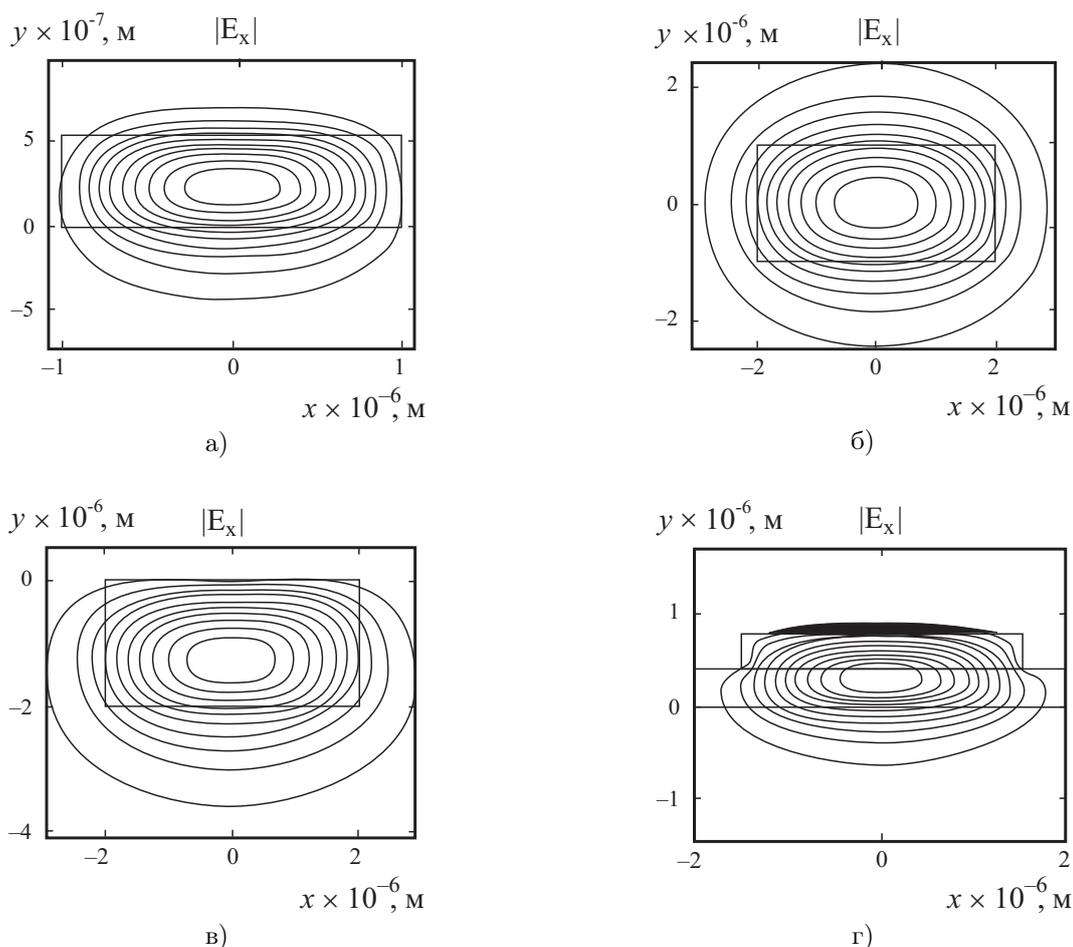


Рис. 4. Распределения напряженности основной компоненты электрического поля E_x фундаментальных квази-ТЕ и квази-ТМ мод в поперечном сечении различных интегрально-оптических волноводов.

a — полосковый волновод, b — погруженный с симметричным профилем показателя преломления, v — внедренный, z — гребенчатый

эта составляющая обращается в нуль. Введение таких функций позволяет автоматически учитывать непрерывность тангенциальных компонент полей на границах раздела сред, имеющих различную диэлектрическую проницаемость (рис. 3).

Для численного решения уравнения (2.1) используется метод Галеркина. Определив невязку на каждом элементе разбиения, сведем задачу к линейно-алгебраической задаче на собственные значения

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & [S_t] - k_0^2 n^2 [T_t] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [e_z] \\ [e_t] \end{pmatrix} = -\beta^2 \times \\ \times \begin{pmatrix} \mu^{-1} [S_z] - k_0^2 n^2 [T_z] & [G]^T \\ [G] & [T_t] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [e_z] \\ [e_t] \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

где коэффициенты уравнения имеют следующий вид:

$$S_z = \iint_e \nabla_t N_i \nabla_t N_j dS, \quad T_z = \iint_e N_i N_j dS,$$

$$S_t = \iint_e (\nabla_t \times \mathbf{N}_i) (\nabla_t \times \mathbf{N}_j) dS,$$

$$T_t = \iint_e \mathbf{N}_i \mathbf{N}_j dS, \quad G = \iint_e \mathbf{N}_i \nabla_t N_j dS.$$

При решении уравнения (2.2) находят составляющие электрического поля и постоянная распространения β . При поиске константы распространения учитывается, что она должна находиться в диапазоне

$k_0 n_s < \beta < k_0 n_f$ (n_s и n_f — показатели преломления слоев, ограничивающих волновод). Матричное уравнение (2.2) записано для одного элемента. Чтобы получить систему для всей области разбиения, необходимо провести стандартное ансамблирование.

3. Результаты расчета интегрально-оптических волноводов

Для всех базовых типов волноводов были определены эффективные показатели преломления квази-ТЕ и квази-ТМ поляризованных фундаментальных мод — N_{TE} и N_{TM} . Результаты расчетов для основных типов волноводов интегральной оптики представлены в таблице (использовались стандартные значения основных параметров).

Одновременно с расчетом эффективных констант распространения были определены распределения полей в поперечном сечении волноводов (рис. 4), что является основой для определения чувствительности любой сенсорной системы, использующей эффект затухающего поля.

Можно сделать вывод о том, что волноводы с высоким перепадом показателей преломления волноведущего слоя и смежных сред невозможно использовать в качестве основы

интерферометров без специального подбора их геометрической формы, в то время как слабонаправляющие волноводы в стекле и полимерных материалах обладают очень низким уровнем двулучепреломления, и для использования в сенсорных устройствах подходят.

Литература

1. Ymeti A., Kanger J.S., Wijn R., Lambeck P. V., Greve J. Development of a multichannel integrated interferometer immunosensor // Sensors and Actuators, B. 2002. V. 83. No. 1–3. P. 1–7.
2. Боголюбов А. Н., Делицын А. Л., Красильникова А. В., Минаев Д. В., Свешиников А. Г. Математическое моделирование волноведущих систем на основе метода конечных разностей // Зарубежная радиоэлектроника. 1998. № 5. С. 39–54.
3. Marcuse D. Solution of the Vector Wave Equation for General Dielectric Waveguides by the Galerkin Method // IEEE J. Quantum Electron. 1992. V. 28. No. 2. P. 459–465.
4. Koshiha M., Maruyama S., Hirayama K. A Vector Finite Element Method With the High-Order Mixed-Interpolation-Type Triangular Elements for Optical Waveguiding Problems // Journal of Lightwave technology. V. 12. No. 3. 1994. P. 495–502.
5. Koshiha M., Tsuji Y. Design and modeling of microwave photonic devices // Optical and Quantum Electronics. 1998. No. 3. P. 995–1004.

Статья поступила 7 июня 2005 г.

Кубанский государственный университет

© Бондаренко С. Г., Векшин М. М., Кулиш О. А., Хотнянская Е. Б., Яковенко Н. А., 2005