

Ф И З И К А

УДК 621.383

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ЮНГА ДЛЯ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

М. М. Векшин¹, О. А. Кулиш², Е. Б. Хотнянская³, Н. А. Яковенко⁴

DEVELOPMENT AND MODELING OF INTEGRATED-OPTIC YOUNG INTERFEROMETER FOR SENSOR SYSTEMS

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

The scheme of a two-beam integrated-optic Young interferometer for biosensor systems has been proposed and its main optical and physical parameters have been determined by numerical modeling.

1. Разработка основ конструкции микрооптического сенсора на основе двухлучевого интерферометра

В микрооптических датчиках для детектирования химико-биологических реагентов, в том числе для задач экологического контроля, в последнее время все шире используется взаимодействие затухающего поля направленных оптических волн с исследуемым реагентом. Все датчики такого рода по существу являются микрооптическими рефрактометрами, в которых изменение состава зондируемой субстанции приводит, в конечном счете, к изменению фазы или амплитуды либо поляризации направленной световой волны [1–3].

В настоящей работе для создания высокочувствительной сенсорной системы обосновывается возможность использования интегрально-оптического варианта интерферометра Юнга. Конструктивно датчик пред-

ставляет собой модифицированный вариант двухлучевого интерферометра, в котором оптические волны на выходе обоих плеч интерферометра выводятся в широкий планарный волновод (рис. 1). Таким образом, на выходном торце интегрально-оптической схемы формируется интерференционная картина. Возможность влияния на разность хода плеч в интерферометре может быть использована для создания сенсора. Изменение разности хода приводит к сдвигу полос интерференционной картины, который фиксируется с помощью фотоприемной ПЗС-матрицы и блока электронной обработки.

Управление параметрами направленной волны в одном плече интерферометра происходит за счет затухающего поля («хвоста») моды в покровной области волновода, то есть окружающей среды. Для регистрации биологических реагентов (в том числе и для задач экологического контроля) покровный слой должен представлять специаль-

¹Векшин Михаил Михайлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

²Кулиш Ольга Александровна, аспирант кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

³Хотнянская Елена Борисовна, канд. биол. наук, старший преподаватель кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

⁴Яковенко Николай Андреевич, д-р техн. наук, профессор кафедры оптоэлектроники, декан физико-технического факультета Кубанского государственного университета.

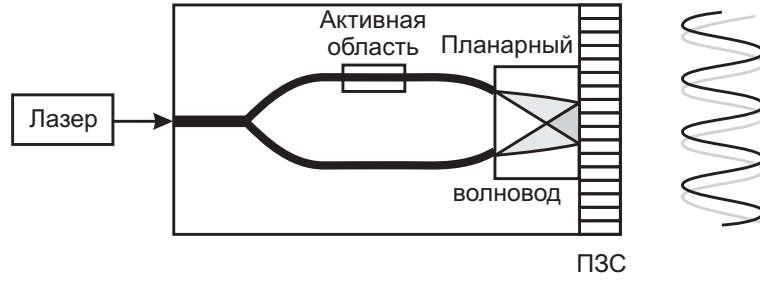


Рис. 1. Схема микрооптического сенсора на основе интерферометра Юнга

ную полимерную матрицу, модифицируемую стандартными биотехнологическими методами функционализации поверхности.

2. Методика электродинамического расчета интегрально-оптического интерферометра

Физико-математическая модель функционирования микродатчика была разработана на основе электродинамического анализа распространения ТЕ- и ТМ-волн с применением методики распространяющегося пучка [4]. Основные задачи расчета сводились к расчету энергетических потерь во входном разветвителе (от этого параметра зависит требуемая чувствительность электронной фотоприемной системы), оценке приемлемых размеров схемы и построению интерференционной картины взаимодействия двух направленных волн.

Для сведения трехмерной задачи к двумерной использован метод эффективного показателя преломления. Для анализа распространяющегося пучка применена неявная конечно-элементная схема Крэнка-Николсона. В целом, топология волноводной схемы была оптимизирована для изготовления шаблона.

ТЕ- и ТМ-поляризованные волны описываются волновым уравнением

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{p}{s} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + s \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - 2jk_0 n_0 p s \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k_0^2 s (q - n_0^2 p) \varphi = 0, \quad (2.1)$$

где введена аппроксимация медленно меняющегося волнового пакета (параксиальное приближение)

$$\Phi(x, z) = \varphi(x, z) \exp(-jk_0 n_0 z). \quad (2.2)$$

Величина Φ — поперечная компонента электрического и магнитного полей;

$$\Phi = E_y, \quad p = 1, \quad q = n^2 \text{ для ТЕ-волн};$$

$$\Phi = E_y, \quad p = 1/n^2, \quad q = 1 \text{ для ТМ-волн.}$$

В уравнениях (2.1), (2.2) $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновой вектор вакуума; λ — длина волны излучения в вакууме; n_0 — средний эффективный показатель преломления волнового пакета; $n = n(x)$ — распределение показателя преломления в поперечном сечении волноводной структуры.

В результате применения метода конечных элементов [4] и стандартной неявной двухслойной схемы для параболического дифференциального уравнения исходная задача сводится к решению на каждом шаге i распространения системы линейных уравнений

$$\mathbf{A}_i \varphi_{i+1} = \mathbf{B}_i \varphi_i.$$

Матрицы $\mathbf{A}_i = \| \|a_{mn}^i\| \|_{m,n=1}^N$ и $\mathbf{B}_i = \| \|b_{mn}^i\| \|_{m,n=1}^N$ определяются следующим образом

$$\mathbf{A}_i = -jk_0 n_0 \mathbf{M}_i + 0,5 \Delta z (\mathbf{K}_i - k_0^2 n_0^2 \mathbf{M}_i),$$

$$\mathbf{B}_i = -jk_0 n_0 \mathbf{M}_i - 0,5 \Delta z (\mathbf{K}_i - k_0^2 n_0^2 \mathbf{M}_i).$$

Здесь \mathbf{M}_i и \mathbf{K}_i — глобальные матрицы на i -ом шаге по оси z , Δz — шаг дискретизации вдоль направления распространения волн.

Матрицы для одного элемента разбиения $\mathbf{K}^e = \| \|k_{mn}^e\| \|_{m,n=1}^3$ и $\mathbf{M}^e = \| \|m_{mn}^e\| \|_{m,n=1}^3$ описываются выражениями

$$\mathbf{K}^e = \int_e \left[k_0^2 q s \mathbf{N} \mathbf{N}^T - \frac{p}{s} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x} \right] dx,$$

$$\mathbf{M}^e = \int_e p s \mathbf{N} \mathbf{N}^T dx,$$

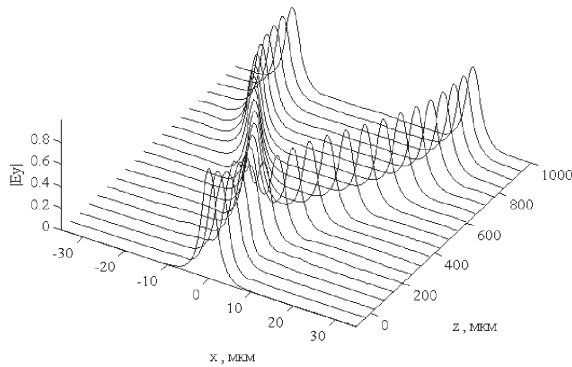


Рис. 2. Картина распространения направленной оптической монохроматической волны в Y-разветвителе

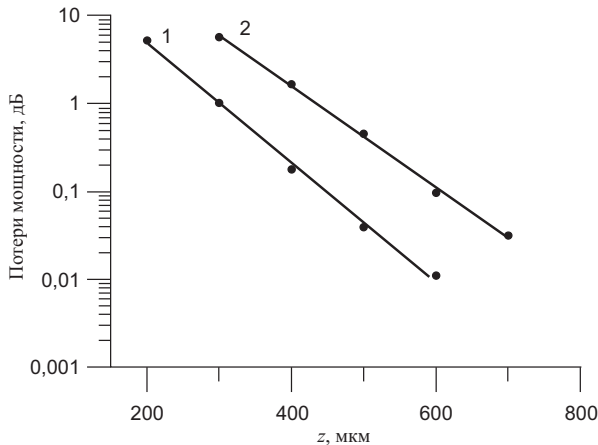


Рис. 3. Зависимость потерь мощности в Y-разветвителе на основе S-изгибов от длины изгиба. Расстояние между каналами 10 мкм (прямая 1); расстояние между каналами 20 мкм (прямая 2)

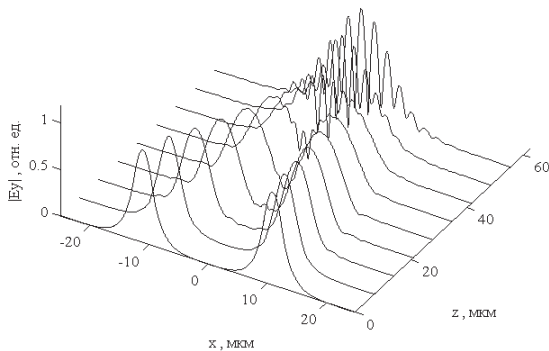


Рис. 4. Картина распространения направленных световых волн в выходном планарном волноводе интерферометра

где $\mathbf{N}^T = (N_1, N_2, N_3)$ — вектор функций формы для элементов первого порядка. Для элементов второго порядка \mathbf{K} и \mathbf{M} имеют размерность 6×6 , $\mathbf{N}^T = (N_1, \dots, N_6)$.

В качестве граничных условий по краям вычислительной области для подавления паразитных отражений использовались условия идеально согласованного слоя (PML).

Для вычислений использовались параметры канального и планарного волноводов, сформированных путем ионного обмена $\text{K}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ в стекле: показатель преломления стеклянной подложки 1,51 и приращение показателя преломления на поверхности 0,01; эффективная глубина диффузии 3 мкм; рабочая длина волны 1,3 мкм; показатель преломления покровного слоя в активной области сенсора 1,37, в остальной области (защитный слой SiO_2) — 1,46.

3. Результаты расчета оптической схемы

На рис. 2 приведена картина распространения направленной оптической волны в направленном Y-разветвителе на основе двух S-изгибов для ионообменного волновода в стекле. Оптимальная функциональная форма S-изгиба задается формулой

$$x = \frac{h}{L}z - \frac{h}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{z}{L}\right),$$

где L — его длина, h — поперечное смещение.

На рис. 3 приведены характерные зависимости потерь в Y-разветвителе от его длины.

Активная область взаимодействия находится в одном из плеч. Для достижения наибольшей чувствительности датчика данная область должна быть максимальных геометрических размеров, которые ограничиваются лишь технологическими факторами. Исходя из расчетных данных, можно сделать вывод о возможности построения методом ионного обмена в стекле размером порядка 2–5 см разветвителя со сверхнизкими радиационными потерями (менее 0,001 дБ).

Построена картина распространения интерферирующих волн в широком выходном канале сенсорного элемента (рис. 4). На рис. 5 показано смещение интерференционных полос при изменении сдвига фаз между оптическими волнами (волноводными модами) на выходе Y-разветвителя на 180° . Исходя из

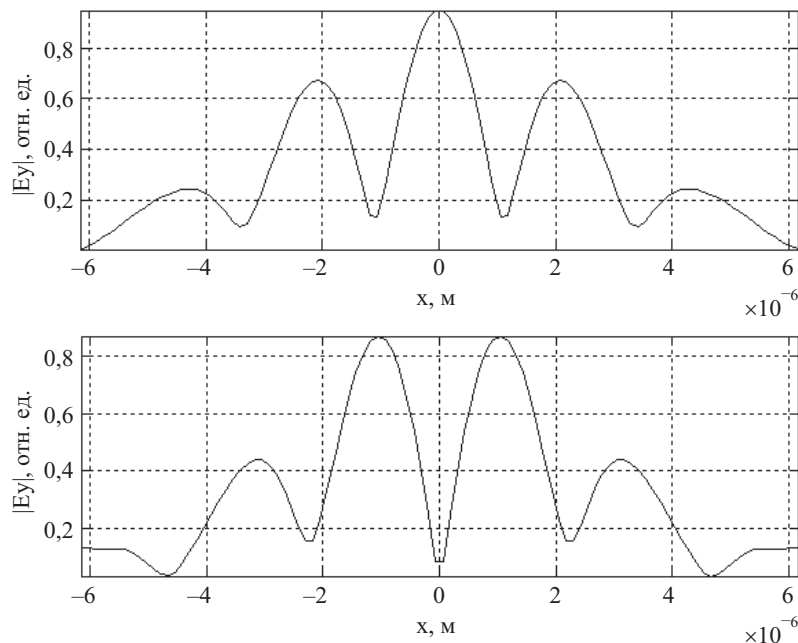


Рис. 5. Смещение полос интерференционной картины взаимодействия двух направленных световых волн на выходе интерферометра при изменении относительного сдвига фаз между ними на 180°

расчетных данных, минимальная длина планарного волновода для сопряжения со стандартной фотоприемной ПЗС-линейки (размер пиксела 25 мкм) должна быть равна не менее 200 мкм.

Таким образом, предложен волноводный микрооптический сенсор на основе интерферометра Юнга и проведен его электродинамический анализ. Дополнительные результаты расчетов затухающего поля в области регистрации позволили связать вносимый сдвиг фаз с изменением показателя преломления покровной среды. В целом, проведенный расчет показал высокую чувствительность такого датчика, позволяющего регистрировать вариации показателя преломления порядка 10^{-7} .

Предлагаемая конструкция обладает определенными преимуществами по сравнению с оптическими датчиками на основе интерферометров Маха-Цендера, так как по сдвигу полос позволяет регистрировать направление изменения показателя преломления (в большую или меньшую сторону). Про-

веденное исследование показывает реальную возможность создания микрооптических многоканальных рефрактометров для использования в составе высокочувствительных биосенсорных систем. С помощью таких сенсоров можно, к примеру, определять уровень супертоксикантов в природных и сточных водах.

Литература

1. www.biocore.com; www.affinity-sensors.com; www.ti.com/spreeta.
2. Векшин М. М., Хотнянская Е. Б., Никитин В. А., Яковенко Н. А. Микроволноводный поляризационный рефрактометр // Микросистемная техника. 2002. № 7.
3. Vekshin M. M., Culish O. A., Yacovenko N. A. Integrated-optic refractometer on channel metal-clad waveguides: three-dimensional simulation and sensitivity considerations // Proceedings of SPIE. 2002. V. 4900. P. 447–450.
4. Tsuji Y., Koshihara M. A finite element beam propagation method for strongly guiding and longitudinally varying optical waveguides // Journal of Lightwave Technology. 1997. V. 14. № 2. P. 217–222.