ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ РЕФРАКТОМЕТР НА ОСНОВЕ КАНАЛЬНОГО МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА: ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

M. M. Beкшин¹, O. A. Кулиш², H. A Яковенко³.

INTEGRAL-OPTICAL REFRACTOMETER BASED ON CHANNEL METAL-DIELECTRIC WAVEGUIDE: THREE-DIMENSIONAL SIMULATION

Vekshin M. M., Culish O. A., Yacovenko N. A.

Three-dimensional method of beam propagation has been used to model a waveguide sensor, based on the plasmon resonance effect. The input waveguide mode efficiently excites the combined waveguide-plasmon wave. The condition of optimal coupling has been selected with the help of mode analysis. It is possible to carry out direct photometric detection of variations of refraction index of 10^{-5} order.

Введение

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 к поляризации направленной световой волны. Оптические датчики объемного типа на основе призменного возбуждения поверхностных волн уже несколько лет выпускаются иностранными фирмами (Biacore, Affinity Sensors, Texas Instruments [1]) для апробации в биохимических лабораториях.

С учетом современного состояния исследований в данной области было проведено физико-математическое моделирование сенсорного устройства на основе эффекта плазмонного резонанса в трехмерной волноведущей структуре. Подобные расчеты выполнялись ранее лишь для планарных (двумерных) оптических структур [2]. Интерес к подобного рода датчикам в последнее время резко возрос, так как на их основе возможно создание многоканальных интегрально-оптических биосенсоров. Основным элементом датчика является диэлектрический интегрально-оптический канальный волновод, покрытый тонкой (~50 нм) металлической пленкой (рис. 1; n_s , n_g , n_m , n_a — показатели преломления подложки, канала, металлической пленки и покровного слоя соответственно) [3]. Входная волноводная ТМ-мода возбуждает оптические моды промежуточной секции. Их затухание зависит от показателя преломления покровного слоя. Все параметры устройства должны быть подобраны для обеспечения значительного изменения пропускания направленной волны.



Рис. 1. Волноводный датчик на эффекте плазмонного резонанса

¹Векшин Михаил Михайлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры оптоэлектроники физико-технического факультета КубГУ. E-mail: vekshin@phys.kubsu.ru

²Кулиш Ольга Александровна, аспирант кафедры оптоэлектроники физико-технического факультета КубГУ.

³Яковенко Николай Андреевич, д-р техн. наук, профессор кафедры оптоэлектроники, декан физикотехнического факультета КубГУ. E-mail: yna@phys.kubsu.ru

1. Анализ распространяющегося пучка и расчет модового состава

Трехмерный метод распространяющегося пучка может корректно описать боковое ограничение направленных волн и плазмонов, что более точно характеризует реально изготавливаемые устройства. Анализ волноводных мод позволяет оценить условие связи входного излучения с плазмонной волной и, следовательно, подобрать расчетные параметры датчика для обеспечения максимальной чувствительности.

ТМ-поляризованная волна описывается волновым уравнением в параксиальном приближении для поперечных компонент электрического и магнитного полей E_y и H_x соответственно [4]:

$$2ik_0n_0\frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{n^2}\frac{\partial n^2 E_y}{\partial y}\right) + k_0^2\left(n^2 - n_0^2\right)E_y, \quad (1.1)$$

$$2ik_0n_0\frac{\partial H_x}{\partial z} = \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + n^2\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{n^2}\frac{\partial H_x}{\partial y}\right) + k_0^2(n^2 - n_0^2)H_x, \quad (1.2)$$

где введена аппроксимация медленно меняющегося волнового пакета [4]. В уравнениях (1.1)–(1.2) k_0 — волновой вектор вакуума, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны излучения в вакууме; n_0 — средний показатель преломления волнового пакета; n = n(x,y) — распределение показателя преломления в поперечном сечении волноводной структуры.

Запишем соответствующие уравнения для расчета модового состава [5]:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2 E_y}{\partial y} \right) + \left(k_0^2 n^2 - \beta^2 \right) E_y = 0, \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + n^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{n^2} \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + \left(k_0^2 n^2 - \beta^2 \right) H_x = 0. \quad (1.4)$$

Специально подобранные формулировки волновых уравнений (1.1)–(1.4) позволяют провести их прямую дискретизацию без необходимости отдельного введения условий непрерывности на границах раздела различных сред [4, 5]. Для планарных волноводов все уравнения упрощаются путем исключения всех частных производных по пространственной координате x. Для решения уравнений (1.1)–(1.2) была использована неявная конечно-разностная схема Крэнка– Николсона. Дискретизация уравнений (1.3)– (1.4) приводит к задаче на собственные значения для несимметричных матриц. Матричные задачи решались с применением стандартных программных пакетов линейной алгебры.

Расчеты проводились следующим образом: определялась модовая структура входного, выходного и промежуточного волноводного сегментов датчика, а затем для всей волноведущей структуры моделировалось прохождение направленной ТМ-волны. Источником поля возбуждения волн металлодиэлектрического волновода служила фундаментальная ТМ₀-мода входного волновода.

Для вычислений использовались стандартные волноводы, сформированные путем ионного обмена K⁺ \leftrightarrow Na⁺ в стекле. Для этих волноводов можно сопоставить результаты расчетов, полученных различными исследователями. В качестве материала для металлической пленки было выбрано серебро. Исходя из целей дальнейшего сопоставления результатов теоретического и экспериментального моделирования, авторы использовали параметры стеклянных волноводов собственного изготовления. Распределение показателя преломления в поперечном сечении волноведущей структуры описывается соотношением [6]

$$n(x,y) = n_s + \Delta n \exp\left(-\frac{x^2}{D_x^2}\right) \operatorname{erfc}(y/D_y),$$

где Δn — приращение показателя преломления на поверхности волновода; D_x и D_y — эффективная ширина и глубина диффузии.

2. Результаты моделирования

Распределения поперечной компоненты магнитного поля в вертикальном направлении для различных показателей преломления покровных сред, полученные путем расчета мод волноводов, показаны на рис. 2, из которого видно, что локализация поля существенно критична к внешней контактирующей с металлом среде.



Рис. 2. Распределение поля ТМ-моды для различных показателей преломления покровной среды: $n_a = 1,3$ (a); $n_a = 1,393$ (b); $n_a = 1,46$ (c)

Мощность выходной ТМ-поляризованной волны во многом зависит от показателя преломления внешних сред, граничащих с тонкой серебряной пленкой вследствие резонансного возбуждения плазмонной волны (рис. 3).

Анализ распространяющегося пучка описывает трансформацию входной волноводной моды в модовую структуру, имеющую вертикальную составляющую распределения магнитного поля, указанную на рис. 2. Данный процесс происходит на достаточно малом расстоянии (рис. 4). Связь с рабочей комбинированной волноводной-плазмонной модой очень эффективная. Это означает, что затухание указанной моды определяет базовые свойства датчика, а связь радиационных мод (мод излучения) активной области с выходной волноводной модой пренебрежимо мала.

Как и ожидалось, трехмерное моделирование лишний раз отобразило принцип работы датчика. Полученные результаты подтверждают выводы, указанные в исследовании [3] для планарных волноводов.

Коэффициент пропускания ТМ-поляризованных волн существенно зависит от показателя преломления покровной среды в области, соответствующей резонансному возбуждения плазмонов, и детектирование вариаций показателя преломления ~ 10⁻⁵ в предположении 1% фотометрии выходного сигнала вполне возможно.



Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания от показателя преломления покровного слоя

Таким образом, проведенное исследование подтверждает реальную возможность создания микрооптических многоканальных рефрактометров для использования в составе высокочувствительных биосенсорных систем. К примеру, с помощью таких сенсоров можно определять уровень супертоксикантов (изопротурона, атразина, симазина, пентахлорфенола) в природных и сточных водах. Чувствительность данного метода по рефрактометрическому эквиваленту очень высока, и ее можно считать более чем достаточной для детектирования данных веществ в пределах официально разрешенных концентраций.



Рис. 4. Трансформация входной волноводной моды в комбинированную волноводно-плазмонную моду

Литература

- 1. www.biacore.com; www.affinity-sensors.com; www.ti.com/spreeta.
- 2. Homola J., Yee S.S., Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review // Sensors and Actuators. B. 1999. Vol. 54. № 13. P. 3–11.
- Vekshin M. M., Culish O. A., Yakovenko N. A. Integrated-optic refractometer on channel metalclad waveguides: three-dimensional simulation and senstivity condiderations // Proceedings of SPIE. 2002. Vol. 4900. P. 447–450.

Статья поступила 6 мая 2003 г.

Кубанский государственный университет

- Huang W. P., Xu C. L. Simulation of threedimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1993. Vol. 29. P. 2639–2649.
- Stern M. S., Chaudhuri S. K. Full vectorial mode calculations by finite difference method // IEE Proceedings (Optoelectronics). 1994. Vol. 141. № 5. P. 281–287.
- 6. Weiss M. N., Srivastava R. Determination of ionexchanged channek waveguide profile parameters by mode-index measurements // Applied Optics. 1995. Vol. 34. № 3. P. 455–458.

^{© 2003} Векшин М. М., Кулиш О. А., Яковенко Н. А.