

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.372.8

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО
МИКРОЛИНЗОВОГО ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО
ОТВЕТВИТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ**

М. М. Векшин, А. В. Никитин, В. А. Никитин, Н. А. Яковенко

*Кубанский государственный университет,
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
E-mail: nikitin@phys.kubsu.ru*

Разработан многоканальный микролинзовый интегрально-оптический ответвитель, выводящий излучение через поверхность подложки, что позволяет располагать приемники сигналов непосредственно на ее поверхности. Изложена методика расчета, создания и исследования ответвителя.

Ключевые слова: микролинзы, интегрально-оптический ответвитель, стеклянная подложка, каналный волновод, электростимулированная миграция ионов, направленные и радиационные моды.

Введение. У интегрально-оптических ответвителей вывод излучения осуществляется через торцы волноводов или через поверхность подложки с помощью призм и дифракционных решеток [1, 2]. Вывод через торец волновода реализуется путем крепления фотоприемников или световодов непосредственно на торце подложки, что не всегда удобно и надежно. Применение призм или дифракционных решеток в этих целях требует дополнительных затрат, связанных с технологией изготовления самих призм, а также использования сложных методов маскирования и травления при изготовлении решеточных элементов связи.

В работе [3] предложен интегрально-оптический элемент ввода–вывода излучения, представляющий собой созданную на конце каналного волновода область с повышенным показателем преломления, имеющую полусферическую форму, у границ которой непосредственно на поверхности подложки могут быть расположены источник излучения и (или) фотоприемник.

На основе такого элемента можно создать интегрально-оптический ответвитель излучения, отличающийся простотой изготовления и выполняю-

щий роль как аттенюатора, так и линейки оптических излучателей, имеющих заданное пространственное распределение излучения.

Целью данной работы является создание интегрального ответвителя оптического излучения, обеспечивающего пространственное распределение излучения с выходом его через поверхность подложки и удобное надежное соединение с приемниками излучения.

Моделирование и конструкция ответвителя. Для осуществления ответвления излучения и вывода его через поверхность подложки на пути распространения излучения, выходящего из закругленного торца канального волновода, вдоль его оптической оси расположен ряд интегрально-оптических микролинз (рис. 1).

Ответвитель излучения состоит из канального волновода 1, сформированного в подложке 2 и имеющего на торце область закругленной формы 3, интегрально-оптических микролинз 4 полусферической формы, расположенных вдоль оптической оси канального волновода. Если на пути излучения, вышедшего из канального волновода, поместить интегральные микролинзы, то часть его выйдет из микролинз на поверхность подложки. Такой ответвитель, с одной стороны, будет выполнять роль аттенюатора, поскольку излучение, выходящее из каждой последующей линзы, будет меньше предыдущего, а с другой – данное устройство можно использовать для подачи оптического сигнала одновременно на несколько приемников, расположенных непосредственно на поверхности подложки.

Расчет картины распространения оптического излучения в элементе ввода–вывода производился с помощью модифицированного численного FDTD-метода (конечно-разностного метода пространственно-временного анализа электромагнитных волн) путем прямого решения уравнений Максвелла во временной области в неоднородной диэлектрической среде. Для расчета двумерной картины распространения ТМ-поляризованных волн уравнения Максвелла представляются в виде

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y}, \quad \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E_y}{\partial t} = -\frac{\partial H_z}{\partial x},$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} = -\left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right),$$

где H_z , E_x , E_y – компоненты векторов напряженности магнитного и электрического полей соответственно; ε_0 , μ_0 – электрическая и магнитная прони-

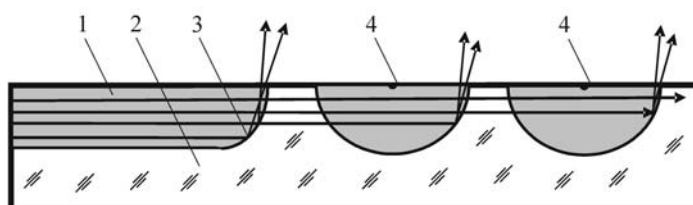


Рис. 1

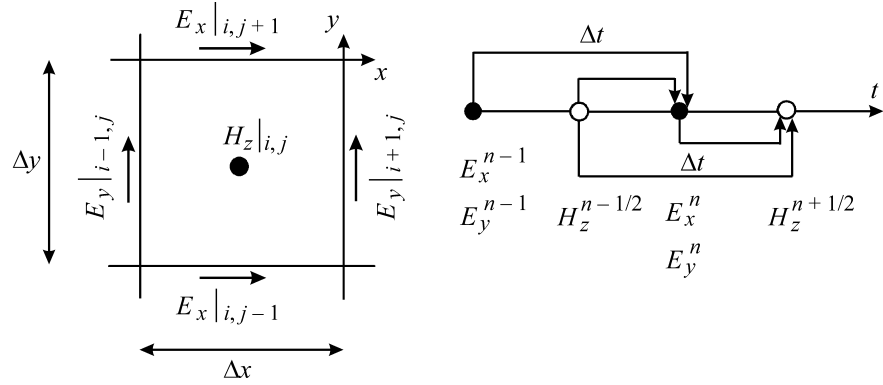


Рис. 2

цаемость вакуума; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Согласно FDTD-методу производится рекуррентное вычисление компонент электрического и магнитного полей в пределах вычислительного окна [4]:

$$E_x|i,j^n = E_x|i,j^{n-1} + C_y^E|i,j \left(H_z|i,j^{n-1/2} - H_z|i,j-1^{n-1/2} \right),$$

$$E_y|i,j^n = E_y|i,j^{n-1} - C_x^E|i,j \left(H_z|i,j^{n-1/2} - H_z|i-1,j^{n-1/2} \right),$$

$$H_z|i,j^{n+1/2} = H_z|i,j^{n-1/2} + C_y^H|i,j \left(E_x|i,j+1^n - E_x|i,j^n \right),$$

где коэффициенты C_x^E , C_y^E , C_y^H имеют следующий вид:

$$C_x^E|i,j = \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \epsilon_r|i,j \Delta x}, \quad C_y^E|i,j = \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \epsilon_r|i,j \Delta y}, \quad C_y^H|i,j = \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y}.$$

Расположение узлов пространственно-временной дискретизации компонент полей показано на рис. 2 (Δx , Δy , Δt – шаги дискретизации). Выборка значений диэлектрической проницаемости ϵ_r производится в тех же узлах дискретизации, при этом в пределах ячейки дискретизации ее значение принимается постоянным.

При вычислениях учитывалась зависимость допустимого шага временной дискретизации от плотности пространственной сетки согласно критерию Куранта:

$$\Delta t \leq 1/v_{\max} \left((1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2 \right)^{-1/2},$$

где v_{\max} – максимальная фазовая скорость волны. Для подавления выходящего излучения по периметру области вычислений вводились искусственные граничные условия с идеально согласованным слоем. Применение такого рода граничных условий сводится к расположению вдоль внешней границы области поглощающего материала с искусственными магнитной и электрической проводимостью. Эти условия видоизменяют исходные уравнения в области поглощающих слоев, и расчет распространения ТМ-поляризованных волн необходимо проводить для двух субкомпонент магнитного поля [5].

Исходя из оптико-геометрической интерпретации распространения световых волн в волноводе по зигзагообразному пути и их соответствия модам различных порядков, можно предположить, что вывод части излучения в покровную среду будет происходить за счет мод волновода высоких порядков на краю микролинзы. Как известно, общее поле излучения представляется как суперпозиция направленных и радиационных мод. Поле входного источника гауссовой формы H_z^{in} в пренебрежении отражением может быть выражено суммой мод различных порядков с разными весовыми коэффициентами:

$$H_z^{in} = \sum_k c_t H_z^k \exp(-i\beta_k x) + \int_0^{k_0 n_s} q_t(\beta') H_z(y, \beta') \exp(-i\beta' x) d\beta',$$

где $H_z^k = H_z^k(y)$ – распределение волноводной моды порядка k ; β_k – константа распространения моды; q_t – коэффициент связи волноводных мод с радиационными (модами излучения); $H_z(y, \beta')$ – распределение поля радиационной моды с константой распространения β' ; n_s – показатель преломления подложки; $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор вакуума (λ – длина волны оптического излучения с частотой ω).

Коэффициент связи входного излучения с волноводными модами определяется по интегралу перекрытия полей:

$$c_t^k = \frac{\beta_k}{2\omega\epsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\epsilon_r(y)} H_z^{in}(y) H_z^{k*}(y) dy.$$

Посредством FDTD-метода рассчитывалась волновая картина распространения каждой волноводной моды, эффективность вывода определялась для нее индивидуально, после чего подсчитывалась суммарная эффективность ответвления оптической волны в покровную среду.

Волновая картина прохождения моды 8-го порядка через элемент ввода-вывода (контуры поля H_z) приведена на рис. 3.

Форма представления посредством модового разложения поля имеет ясный физический смысл и более наглядна, так как рассматривается волноводная структура с большим числом мод и ступенчатым изменением показателя преломления. При расчете использовались типичные значения показателя преломления стеклянной подложки 1,5, показателя преломления волноводного слоя 1,6, полученного электростимулированной миграцией ионов, и показателя преломления покровной среды 1,0 для длины волны оптического излучения 1,55 мкм. Расчетный радиус кривизны микролинзы составлял 30 мкм. Полуширина ТМ-поляризованного гауссова пучка на входе волново-

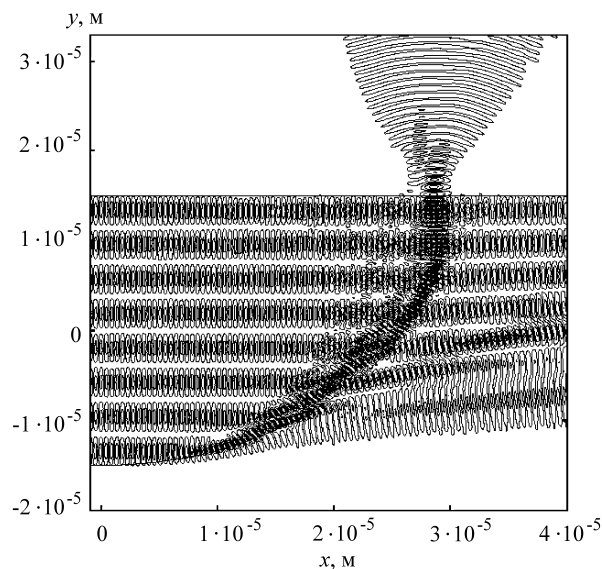


Рис. 3

да равнялась 15 мкм. Для данных параметров согласно расчету ответвляется около 2 % входной оптической мощности. При уменьшении длины волны излучения до $\lambda = 0,63$ мкм общее число мод увеличивается, что приводит к росту интенсивности излучения, ответвляемого линзами, до 5 %.

Исследование ответвителя. Интегрально-оптический ответвитель был изготовлен в стекле от фотопластин при помощи электростимулированной миграции ионов серебра из расплава солей AgNO_3 и NaNO_3 , взятых в соотношении 1 : 10 моль. Температура расплава составляла 380°C , стимулирующее напряжение равнялось 40 В, а время процесса – 15 мин.

Изображение интегрально-оптического ответвителя излучения на основе двух микролинз показано на рис. 4. Поскольку волновод и микролинзы изготавливались одновременно, то диаметр микролинз примерно равен ширине волновода, кроме того, и волновод и микролинзы имели ступенчатый профиль изменения показателя преломления, что характерно для интегрально-оптических элементов, получаемых с помощью электростимулированной миграции ионов из расплавов солей [6, 7].

Исследование ответвителя проводилось на стенде, блок-схема которого представлена на рис. 5.

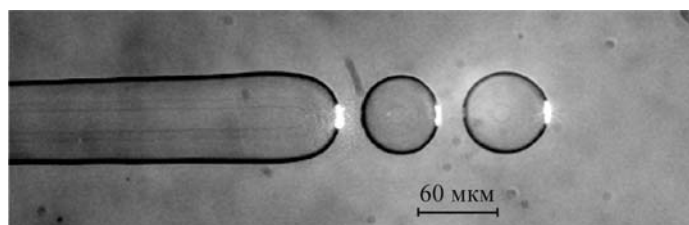


Рис. 4

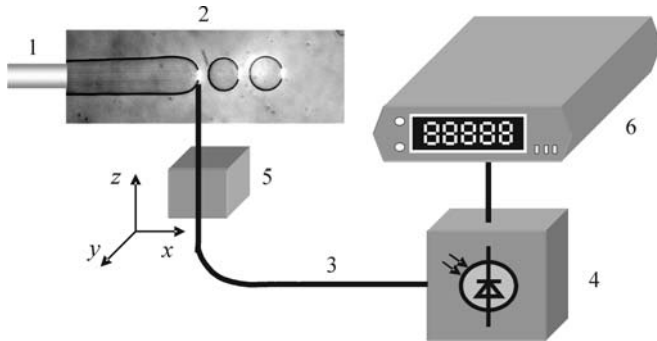


Рис. 5

Излучение 1 He–Ne-лазера вводилось в торец многомодового канального волновода интегрально-оптического ответвителя 2. Измерительное оптическое волокно 3 входным торцом располагалось у поверхности подложки ответвителя, а выходной торец был сочленен с фотоприемником 4. Для измерения фототока использовался цифровой вольтметр 6, работавший в режиме регистрации тока. Трехкоординатный столик 5, на котором было закреплено измерительное оптическое волокно, позволял приводить волокно в непосредственный контакт с поверхностью исследуемого образца и перемещать волокно относительно ответвителя. Таким образом, путем перемещения измерительного волокна вдоль оси x было получено распределение интенсивности оптического излучения в результате деления.

Распределение интенсивности оптического излучения на выходе ответвителя показано на рис. 6. Как видно из рисунка, деление оптического излучения осуществляется довольно равномерно. Уменьшение интенсивности от линзы составляет примерно 5 %. В то же время интенсивность излучения, выходящего из закругленной части волновода и каждой из линз, составляет по результатам измерения те же 5 % от величины интенсивности вводимого излучения.

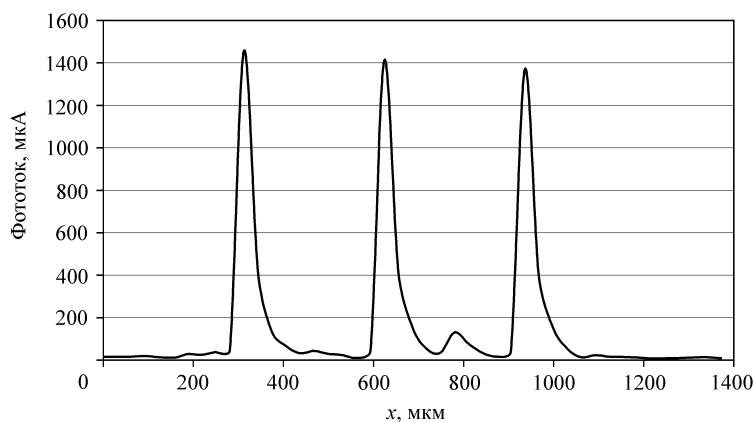


Рис. 6

Заключение. Таким образом, представленный многоканальный микролинзовый интегрально-оптический ответвитель излучения позволяет не только направлять часть вводимого излучения и выводить его через поверхность подложки, на которой он сформирован, но и обеспечивает удобное и надежное крепление приемников излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тамир Т.** Интегральная оптика: Пер. с англ. М.: Мир, 1978.
2. **Ханспенджер Р.** Интегральная оптика. Теория и технология: Пер. с англ. М.: Мир, 1985.
3. **Пат. РФ № 2207604.** Устройство ввода–вывода оптического излучения в канальный волновод //И. В. Внуковская, В. А. Никитин, Н. А. Яковенко. Опубл. 27.06.2003, Бюл. № 18.
4. **Taflove K., Hagness S. C.** Computational Electrodynamics. N. Y.: Artech House, 2005.
5. **Berenger J.–P.** A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // Journ. Comput. Phys. 1994. **114**, N 2. P. 185–200.
6. **Ramaswamy R. V., Srivastava R.** Ion-exchanged glass waveguides: A review // Journ. Lightwave Technol. 1988. **6**, N 6. P. 984–1002.
7. **Никитин В. А., Яковенко Н. А.** Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике. Краснодар: Изд-во Кубан. гос. ун-та, 2003.

Поступила в редакцию 21 марта 2008 г.