ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ЛИНЗА ДЛЯ СОПРЯЖЕНИЯ ДВУХ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ

В.В. Котляр[1,2], Я.Р. Триандафилов[2], А.А. Ковалев[1], М.И. Котляр[1], А.В. Волков[1,2], Б.О. Володкин[1,2], В.А. Сойфер[1,2], Лим О'Фелон[3], Томас Краусс [3]
[1] Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,
[2] Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,
[3]Школа физики и астрономии Университета Сент-Эндрюса, Великобритания

Аннотация

Спроектировано, изготовлено и исследовано новое устройство нанофотоники, содержащее двумерную фотонно-кристаллическую линзу размером 3x4 мкм, изготовленную в пленке кремния на плавленом кварце и расположенную на выходе планарного волновода шириной 4,5 мкм, которая служит для сопряжения с другим планарным волноводом шириной 1 мкм. Длина обоих волноводов 5 мм. При смещении с оптической оси узкого волновода на 1 мкм интенсивность света на его выходе уменьшается в 8 раз, это означает, что размер фокусного пятна на выходе линзы в кремнии меньше 1 мкм. Моделирование показало, что максимальное пропускание это устройство имеет на длине волны 1,55 мкм, и эффективность связи двух волноводов – 73%. Измеренный спектр пропускания имеет четыре локальных максимума в диапазоне 1,50-1,60 мкм. Расчетный спектр пропускания отличается от экспериментального на 29%. Диаметр фокусного пятна линзы в воздухе, рассчитанный по полуспаду интенсивности, равен 0,32λ, где λ – длина волны, что меньше дифракционного предела, который задается *sinc*-функцией и равен 0,44 λ.

Ключевые слова: фотонно-кристаллическая линза, планарные волноводы, острая фокусировка света, сопряжение двух разных волноводов, электронная литография.

1. Введение

В последние годы активно исследуются различные устройства микро- и нанофотоники для сопряжения двух волноводов различных типов, например, обычное одномодовое волокно с проволочным или планарным волноводом или планарный волновод с фотонно-кристаллическим (ФК) волноводом. Известны следующие устройства нанофотоники для сопряжения двух волноведущих структур:

- адиабатически сужающиеся (taper) и гребешковые (ridge) волноводы для сопряжения с ФК-волноводами [1-7]; при этом волноведущие структуры могут не только стыковаться друг с другом выходом к входу, но и накладываться параллельно друг другу [8];
- дифракционные решетки Брегга в волноводе [9-12] для вывода излучения из волокна; при этом волокно с решеткой Брегга может лежать на поверхности планарного волновода [13];
- параболическое микрозеркало под углом для ввода в планарный волновод [14];
- обычные рефракционные линзы или микро-линзы [15-18];
- суперлинзы Веселаго с отрицательной рефракцией: плоская [19-26] или с одной вогнутой поверхностью [27-29];
- устройства сопряжения в миллиметровой области спектра: суперлинзы [30,31] и ФК-линзы [32]. Известны также работы по сопряжению двух разных ФК-волноводов [33].

Сужающиеся волноводы могут иметь высокую эффективность связи, если ширина мод в гребешковом волноводе и ФК-волноводе сравнимы друг с другом. В этом случае эффективность связи (то есть отношение энергии на выходе устройства к энергии на входе) может достигать 80% [1], 90% [4], 95% [2] и даже почти 100% [6]. Если же ширина гребешкового волновода (1,6 мкм) в несколько раз больше, чем ширина ФК-волновода (200 нм), то эффективность связи уменьшается до 60% [3]. При еще большей разнице ширин сопрягаемых волноводов размер адиабатически сужающейся части волновода становится относительно большим: при сжатии моды одномодового волокна с диаметром сердечника 4,9 мкм до размеров моды планарного волновода шириной 120 нм, длина тейпера (taper) – 40 мкм [5], а волновод сечением 0,3x0,5 мкм сужается до диаметра 75 нм на расстоянии 150 мкм [7].

Устройства сопряжения, которые вводят излучение из одномодового волокна в планарные волноводы или ФК-волноводы с помощью дифракционных решеток на волноводе, также имеют участки сужения. Например, сужение гауссового пучка с диаметром перетяжки 14 мкм до размера волновода шириной 1 мкм выполняется тейпером длиной всего 14 мкм [9,10]. При этом экспериментальная эффективность связи – 35% [10] без зеркального слоя на обратной стороне волновода, и 57% [9] - с зеркалом. Ввод гауссового пучка с длиной волны 1,3 мкм в волновод был осуществлен с помощью дифракционной решетки на волноводе [10]. Аналогичное

устройство сопряжения с решеткой на волноводе из кремния с периодом 630 нм и тейпером 20-40 мкм, но для длины волны 1,55 мкм, имело экспериментальную эффективность 33% (с зеркалом – 54%) [11]. Более качественно изготовленное устройство ввода излучения из одномодового волокна с помощью дифракционной решетки в кремнии с периодом 610 нм и шириной 10 мкм в проволочный (wire) волновод шириной 3 мкм имело экспериментальную эффективность связи – 69% [12]. Расчетную эффективность связи более 90% имеет устройство сопряжения (J-coupler), которое связывает широкий волновод (10 мкм) с ФК-волноводом (420 нм) с помощью параболического зеркала размером 15x20 мкм для длины волны 1,3 мкм [14]. При этом оба волновода и параболическое зеркало выполнены в пленке кремния (показатель преломления n = 3,47).

Обычные рефракционные линзы и микролинзы также успешно применяются в задачах сопряжения. Например, волновод в кремнии (n = 3,092) шириной 1-2 мкм имеет на конце линзу, которая позволяет с расчетной эффективностью 90% связать этот волновод с ФК-волноводом тоже в кремнии (n = 3,342) [15]. Моделирование показало [17], что одномодовое волокно диаметром 10,3 мкм (длина волны λ = 1,55 мкм) с помощью коллимирующей линзы из стекла ВК7 (числовая апертура NA = 0,1) с радиусом R = 1,77 мм и с помощью фокусирующей микролинзы из кремния с радиусом апертуры 123 мкм можно состыковать с ФК-волноводом с сечением моды 0,19x0,27 мкм с эффективностью 80%. При этом микролинза создает внутри ФК-волновода фокусное пятно с диаметром по полуспаду FWHM = 0,24λ (числовая апертура волновода NA = 2,2).

Особое место среди устройств сопряжения имеют устройства на основе 2D суперлинз (или линз Веселаго), работа которых основана на явлении отрицательной рефракции. Получить суперлинзу с эффективным показателем преломления близким к -1 можно с помощью фотонных кристаллов. Суперлинзу используют для изображения точечного источника. Причем первое изображение возникает внутри линзы, а второе изображение – за линзой на расстоянии $2B$-A, где B – толщина плоскопараллельной линзы, A – расстояние от линзы до источника [19,23]. В [21] показано, что если 2D точечный источник света описать функцией Ханкеля $H_0(kr)$, k – волновое число, r – расстояние от источника до точки наблюдения, то изображение будет пропорционально функции Бесселя $J_0(kr)$. То есть пятно изображения, сформированное суперлинзой имеет диаметр FWHM = 0,35λ. В [24] моделирование работы 2D ФК-суперлинзы показало, что если эта линза состоит всего из двух слоев диэлектрических стержней (диэлектрическая проницаемость ε = 12,96, длина волны λ = 1,55 мкм) радиусом r = 0,45a, где a – период решетки стержней, то при циклической частоте ω = 0,293a/λ показатель преломления будет равен n = -1, точечный источник, расположенный на расстоянии A = 0,26λ от линзы, изобразится примерно на таком же расстоянии с другой стороны линзы, и ширина пятна изображения будет FWHM = 0,36λ. В некоторых работах рассмотрена линза Веселаго не в виде плоскопараллельного ФК-слоя, а с одной вогнутой поверхностью. Так, в [27] показано, что ФК-линза из прямоугольной решетки стержней с ε = 10 и магнитной проницаемостью μ = 1,5 с периодом a = 0,48 см, радиусом стержней r = 0,4a, имеет эффективный показатель преломления n = -0,634. И если эта 2D линза плоско-вогнутая с радиусом кривизны поверхности R = 3,31 см, то фокус такой суперлинзы будет находиться на расстоянии $f = R/(1-n)$, для TE-поляризации - f = 1,69 см, а для TM-поляризации - f = 2,38 см. Частота излучения равна ω = 0,48a/λ. В [28] приведены результаты моделирования ввода излучения в ФК-волновод с помощью суперлинзы с вогнутой поверхностью. ФК-линза имела толщину 8,6a и апертуру 38a, а сам ФК состоял из 2D решетки отверстий с периодом a = 465 нм в GaAs (ε = 12,96) и диаметром 2r = 372 нм. При этом в фокусе линзы на расстоянии 7,56λ (λ = 1,55 мкм) формировалось фокусное пятно радиусом 0,5λ, если осветить линзу гауссовым пучком с радиусом перетяжки 3λ. Затем излучение после линзы попадало в 3W ФК-волновод (3W – означает, что ширина волновода равна трем периодам решетки ФК) шириной 3a (около λ). К сожалению, эффективность ввода такой структуры в [28] не приводится. В [29] также обсуждаются результаты моделирования ввода излучения из одномодового волокна в ФК-волновод с помощью ФК-суперлинзы (плоско-вогнутой, n = -1). Толщина линзы 16a = 4,8λ, апертура 25a, и состоит она из треугольной решетки отверстий с периодом a = 0,305λ и радиусом r = 0,4a в GaAs. Радиус кривизны вогнутой поверхности линзы R = 2,1λ, фокусное расстояние f = 1,05λ.

Рассчитанная эффективность ввода в ФК-волновод с ε = 12,96, r' = 0,2a, a' = 0,312λ была равна 95%. Ширина волновода была равна одному периоду ФК-решетки a, а циклическая частота ω = 0,315a/λ. К сожалению, размер фокусного пятна такой линзы не приводится.

В [34-36] рассмотрен другой тип ФК-линзы. Решетка отверстий такой 2D ФК-линзы имеет постоянный период, но размер отверстий изменяется в соответствии с некоторой функцией. Известна градиентная линза Микаэляна [37], которая все лучи, параллельные оптической оси и падающие перпендикулярно на ее переднюю плоскую поверхность, собирает в точку на оптической оси на противоположной (задней) плоской поверхности линзы. Такая осе-симметричная градиентная линза имеет зависимость показателя преломления от радиальной координаты (расстояние от оптической оси) в виде:

$$n(r) = n_0 \left[ch\left(\frac{\pi r}{2L} \right) \right]^{-1}, \qquad (1)$$

где n_0 – показатель преломления на оптической оси, L – толщина линзы вдоль оптической оси. В [33] промоделирована 2D линза Микаэляна с апертурой 12 мкм, состоящая из 7 столбцов отверстий с периодом 0,81 мкм для длины волны λ = 1,55 мкм. Эффективность ввода из широкого волновода (12 мкм) в ФК-волновод шириной 1,5 мкм и с эффективным показателем преломления n = 1,73 составила 55%. ФК-волновод состоял из решетки отверстий с периодом 0,63 мкм и диаметром 0,4 мкм. В этой работе тоже не приводятся характеристики фокусного пятна линзы. В [35, 36] моделировалась аналогичная ФК-линза Микаэляна, но с другими параметрами. Толщина линзы 3 мкм, 12 столбцов отверстий, апертура линзы 4 мкм, показатель преломления 1,5, длина волны 1,5 мкм. Пятно фокусировки имело диаметр FWHM = 0,42λ, а от нуля до нуля интенсивности диаметр фокусного пятна был равен 0,8λ.

В данной работе было промоделировано, изготовлено и исследовано новое ультракомпактное устройство нанофотоники, позволяющее эффективно связывать 2D волноводы разной ширины с помощью ФК-линзы Микаэляна (ФКЛМ). Устройство было изготовлено по технологии «кремний на диоксиде кремния», ширина входного волновода 4,5 мкм, ширина выходного волновода 1 мкм, размер ФКЛМ 3x4 мкм.

Линза состоит из матрицы отверстий 12x17 с периодом решетки отверстий 250 нм, и диаметр отверстий меняется от центра к периферии с 160 до 200 нм. Устройство работает в диапазоне длин волн 1,5–1,6 мкм. Рассчитанная эффективность связи варьировалась от 40% до 80% в зависимости от ширины выходного волновода. ФКЛМ фокусирует свет в малое фокусное пятно в воздухе сразу за линзой, которое по полуспаду интенсивности равно FWHM = 0,36λ, что в 1,22 раза меньше, чем скалярный дифракционный предел разрешения в 2D случае, который определяется шириной *sinc*-функции и равен FWHM = 0,44λ.

2. Моделирование

Моделирование 2D ФКЛМ

Фотонно-кристаллическая линза Микаэляна, которая моделируется в работе, состояла из матрицы отверстий 12x17 в кремнии (эффективный показатель преломления для TE-волны n = 2,83), постоянная решетки отверстий – 250 нм, минимальный диаметр отверстий на оптической оси – 186 нм, максимальный диаметр отверстий на краю линзы – 250 нм. Толщина линзы вдоль оптической оси – 3 мкм, ширина линзы (апертура) – 5 мкм. Длина волны λ = 1,55 мкм.

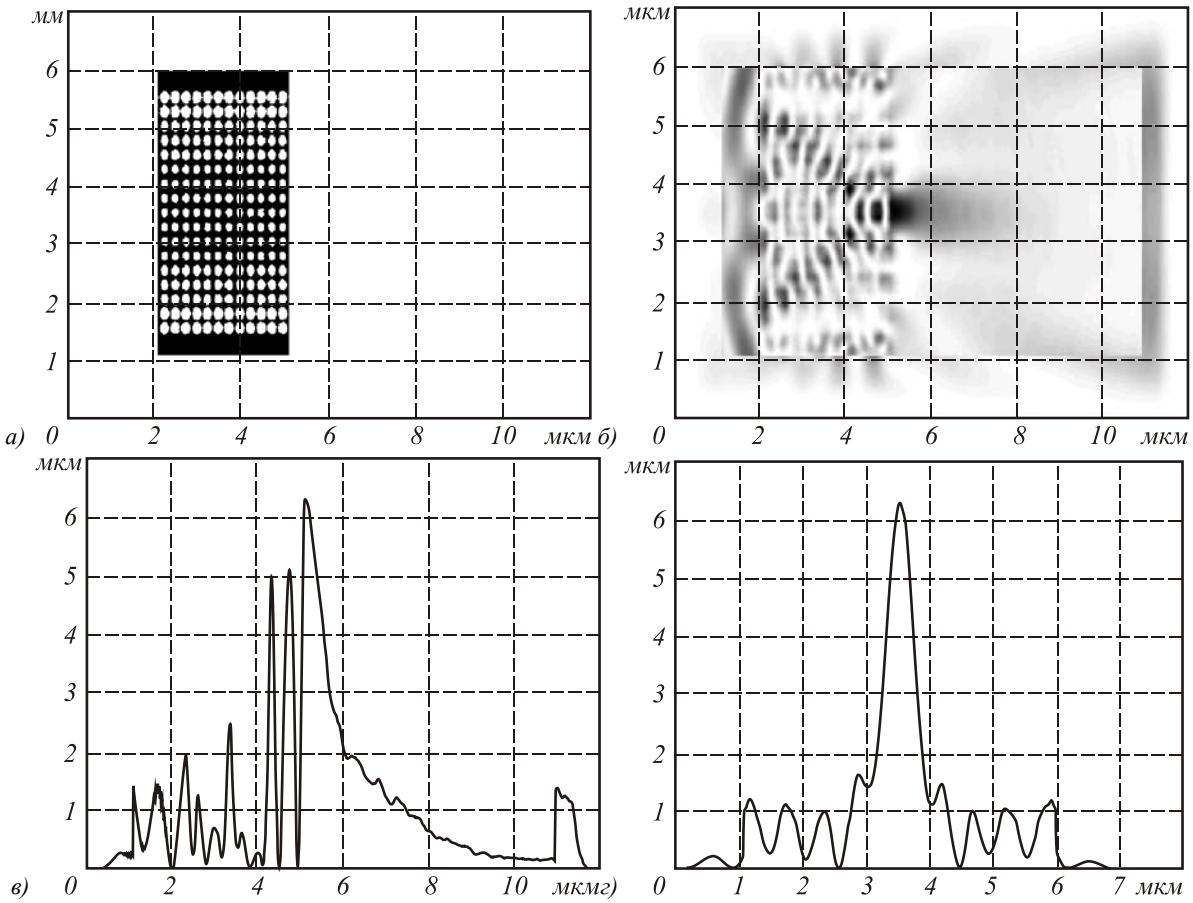

Рис. 1. 2D ФКЛМ 12x17 отверстий в кремнии, размер 3x4 мкм (а), поле дифракции света (плоская TE-волна) или 2D-распределение интенсивности $|E_x|^2$, y – вертикальная ось, z – горизонтальная ось (б), распределение интенсивности вдоль оптической оси (в) и в плоскости фокуса (г)

Моделирование проводилось с помощью разностного метода решения уравнений Максвелла FDTD, реализованного на языке программирования C++. На рис. 1*а* показана 2D ФК-линза в кремнии, описанная выше, а на рис. 1*б* - двумерная полутоновая картина дифракции (усредненная во времени) плоской волны TE-поляризации с амплитудой E_x (ось *x* перпендикулярна плоскости рис. 1). На рис. 1*в* и рис. 1*г* показаны распределения интенсивности $\left|E_x(y,z)\right|^2$ вдоль оптической оси *z* и вдоль перпендикулярной к оптической оси линии *y*, на которой находится фокус (*z* = 5,5 мкм). Размер фокусного пятна по полуспаду интенсивности равен FWHM = 0,36λ, а продольный размер фокуса равен FWHM = 0,52λ (рис. 1*в,г*).

Моделирование ФК-линзы внутри волновода

Моделировалась ФК-линза с параметрами из предыдущего раздела (рис. 1*а*), но расположенная на выходе волновода в кремнии шириной 5 мкм и длиной 5 мкм (плюс длина линзы 3 мкм, всего длина волновода с линзой вдоль оптической оси 8 мкм) (рис. 2*а*).

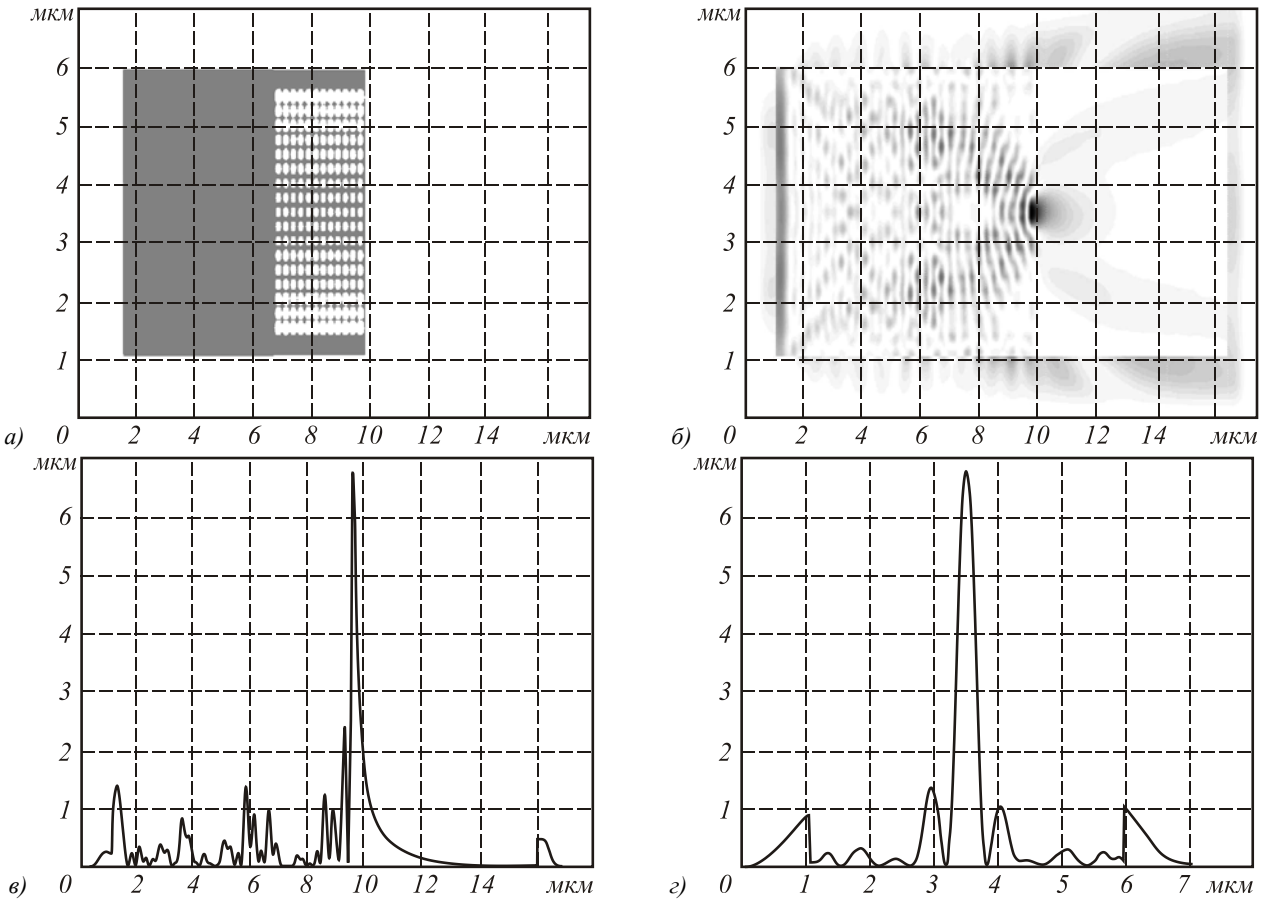

Рис. 2. 2D ФК-линза на выходе волновода (а), полутоновая картина дифракции плоской TE-волны с амплитудой E_x, падающей на вход волновода длиной 5 мкм, на выходе которого расположена линза длиной 3 мкм (б), распределение интенсивности $\left|E_x\right|^2$ вдоль оптической оси (в) и в фокусе линзы (г). Интенсивность дана в произвольных единицах. Расчет велся в диапазоне от 1 мкм до 6 мкм (г)

Поле дифракции (интенсивность $\left|E_x(y,z)\right|^2$), рассчитанное FDTD методом и усредненное по времени, показано на рис. 2*б* (длина волны 1,45 мкм). На рис. 2*в* показано распределение интенсивности вдоль оптической оси. Из сравнения рис. 1*в* и рис. 2*в* видно, что интенсивность в фокусе увеличилась, а амплитуда модуляции интенсивности внутри линзы уменьшилась (хотя на рис. 1*г* и 2*г* единицы произвольные, на входе в волновод в обоих случаях энергия была одинаковой). Это связано с тем, что различие показателей преломления между линзой и волноводом (рис. 2*в*) гораздо меньше, чем между линзой и воздухом (рис. 1*в*), и поэтому меньше амплитуды волны, отраженной от раздела сред. На рис. 2*г* показано распределение интенсивности в фокусе линзы вдоль линии, параллельной оси *y*. Из рис. 2*г* видно, что диаметр фокусного пятна по полуспаду интенсивности равен FWHM = 0,31λ. Из сравнений рис. 2*г* и рис. 1*г* видно, что кроме уменьшения диаметра фокусного пятна в случае ФК-линзы в волноводе, также уменьшились боковые лепестки картины дифракции в фокусе.

Заметим, что скалярная теория в 2D случае описывает дифракционно-ограниченный фокус *sinc*-функцией: $E_x(y,z) = \mathrm{sinc}\left(2\pi y/(\lambda NA)\right)$, которая при максимальной числовой апертуре NA = 1 дает дифракционный предел фокусного пятна диаметром по полуспаду интенсивности равный FWHM = 0,44λ. Для суперлинзы [21] предельное значение пятна фокусировки описывается функцией Бесселя $J_0(kr)$ и дает значение диаметра по полуспаду интенсивности FWHM = 0,35λ. Таким образом, линза на рис. 2*а* фокусирует свет в пятно меньше дифракционного предела.

Моделирование показало, что спектральная зависимость интенсивности в фокусе линзы в диапазоне длин волн 1,3–1,6 мкм имеет два максимальных значения для длин волн 1450 нм и 1600 нм (оба максимума спектральной зависимости имеют ширину около 20 нм). На остальных длинах волн из этого диапазона интенсивность фокуса в 2-3 раза меньше. С ростом длины волны фокус смещается к поверхности линзы, и при λ = 1,6 мкм фокус уже находится внутри линзы.

Моделирование связи двух волноводов с ФК-линзой

На рис. 3*а* показано устройство сопряжения двух 2D волноводов с помощью ФКЛМ. Ширина входного волновода 5 мкм, выходного – 0,5 мкм. ФК-линза в кремнии (n = 2,83) имеет матрицу 12x19 отверстий с периодом решетки 0,25 мкм. Диаметры отверстий такие же, как в предыдущих разделах. Длина волны 1,55 мкм. Оба волновода имеют длину по 6 мкм.

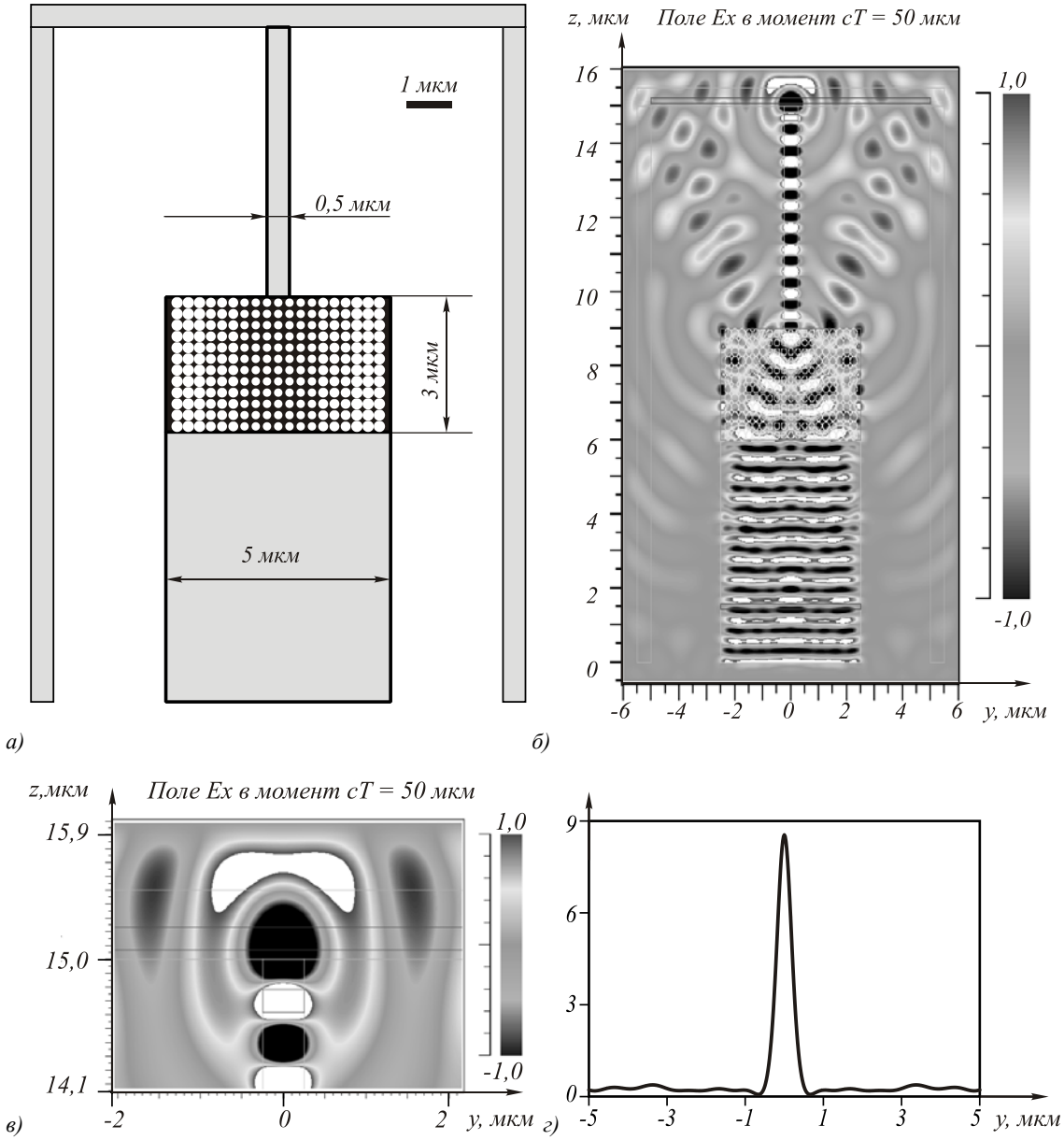

Рис. 3. Схема сопряжения двух планарных волноводов с помощью ФК-линзы (а), мгновенная картина дифракции ТЕ-волны, рассчитанная методом FDTD с помощью программы FullWAVE 6.0 (б) и увеличенный фрагмент этой картины на выходе из волокна шириной 0,5 мкм (в), распределение интенсивности на выходе из волокна (г)

Моделирование проводилось с помощью метода FDTD, реализованного в программе FullWAVE 6.0 (фирмы RSoft, США). На рис. 3*б* показана мгновенная картина дифракции TE-волны. Эффективность связи – 45%. Часть излучения (около 20%) отражается от линзы назад во входной волновод, часть излучения проходит линзу, но не попадает в узкий волновод. На рис. 3*в* показан увеличенный фрагмент картины дифракции на рис. 3*б* на выходе из узкого выходного волновода. Распределение интенсивности $|E_x(y,z)|^2$ вдоль этой поперечной оси *y* на выходе из узкого волокна показано на рис. 3*г*. Диаметр лазерного пятна на выходе по полуспаду интенсивности равен FWHM = 0,32λ (рис. 3*г*). Заметим, что если вместо выходного волновода шириной 0,5 мкм использовать волновод шириной 1 мкм, то вместо диаметра фокального пятна FWHM = 0,32λ получим FWHM = 0,21λ, где λ – длина волны в вакууме. Это меньше, чем ранее сообщалось в [17] (FWHM = 0,24λ).

Моделирование влияния промежутка между волноводами

На рис. 4 показана 2D схема связи двух соосных волноводов с промежутком между ними.

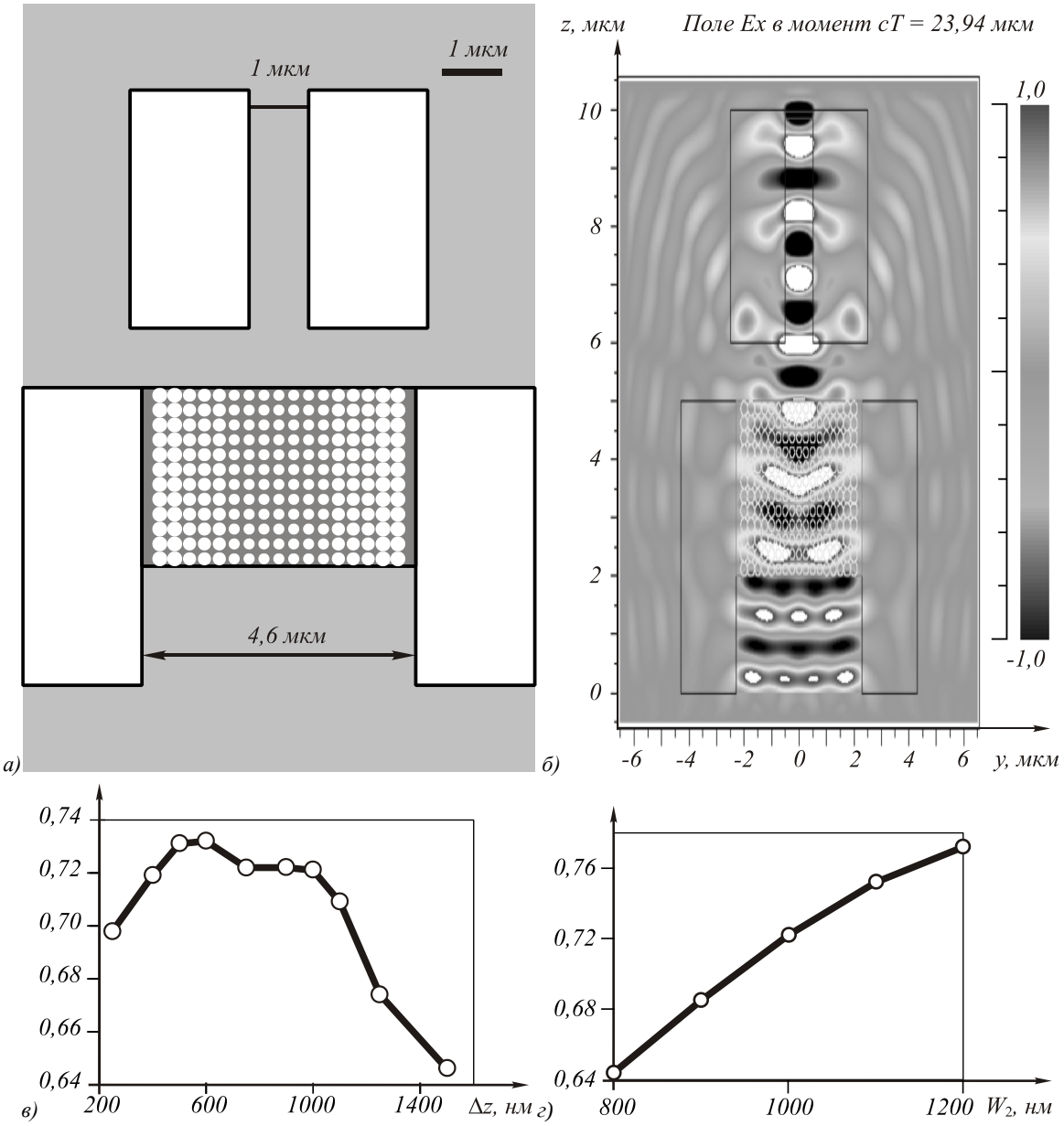

Рис. 4. 2D схема связи двух волноводов с помощью ФК-линзы при наличии промежутка Δz = 1 мкм между волноводами (серый цвет – материал, белый цвет – воздух) (а); мгновенное распределением интенсивности $|E_x(y,z)|^2$ TE-волны, рассчитанное с помощью FullWAVE (б); зависимости эффективности связи от величины промежутка между волноводами Δz (в) и от ширины выходного волновода W_2 (г)

Ширина входного волновода с ФК-линзой W_1 = 4,6 мкм, выходного W_2 = 1 мкм, промежуток между волноводами Δz = 1 мкм. Остальные параметры: λ = 1,55 мкм, n = 1,46, ФК-линза сотоит из 12x17 матрицы отверстий с периодом a = 0,25 мкм и диаметром отверстий от 186 до 250 нм. На рис. 4*а* серым цветом показан материал волноводов (n = 1,46), а белым цветом – воздух (n = 1). На рис. 4*б* показана мгновенная картина интенсивности $\left|E_x(y,z)\right|^2$ для ТЕ-волны, рассчитанная с помощью программы FullWAVE 6.0 для схемы на рис. 4*а*. На рис. 4*в* показана зависимость эффективности связи (отношение интенсивности света на выходе узкого I волновода к интенсивности на входе в широкий волновод I_0) от величины расстояния между волноводами Δz. Из рис. 4*в* видно, что максимальная эффективность связи 73% достигается при величине промежутка между волноводами равной 0,6 мкм. Заметим, что в промежутке между волноводами находится не воздух, а материал волноводов (n = 1,46).

На рис. 4*г* показана рассчитанная зависимость эффективности связи для случая на рис. 4*а* от ширины выходного волновода W_2 при величине промежутка Δz = 1 мкм. Из рис. 4*г* видно, что с ростом ширины выходного волновода W_2 эффективность связи почти линейно растет.

3. Изготовление двух 2D волноводов, связанных ФК-линзой

Планарные волноводы по схеме на рис. 4*а* были записаны на резист PMMA по технологии прямой записи электронным лучом при напряжении 30 кВт с помощью литографа ZEP520A (Университет Сент-Эндреса, Шотландия). Обработка резиста с целью устранения «засвеченных» электронным пучком участков осуществлялась ксиленом (xylene). После этого в смеси газов CHF_3 и SF_6 с помощью технологии реактивного ионного травления (RIE) происходило дальнейшее травление материалов плазмой. То есть происходила передача картины 2D волноводов с ФК-линзой (рис. 4*а*) в пленку кремния (технология SOI: silicon-on-insulator): пленка кремния толщиной 220 нм на слое плавленого кварца толщиной 2 мкм. Глубина травления около 300 нм. Диаметр отверстий ФК-линзы варьировался от 160 нм до 200 нм. Длина всего образца (длина двух волноводов) была 5 мм. На одной подложке было одновременно изготовлено несколько подобных структур, отличающихся промежутками между волноводами Δz = 0 мкм, 1 мкм, 3 мкм и несколько структур, отличающихся смещением между осями двух волноводов Δx = 0 мкм, ±0,5 мкм, ±1 мкм. На рис. 5 показана увеличенная в 7000 раз фотография (вид сверху) двух изготовленных волноводов с промежутком Δz = 1 мкм и с ФК-линзой, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Параметры образца на рис. 5 следующие. Проектная ширина волноводов W_1 = 4,5 мкм и W_2 = 1 мкм, ФК-линза состоит из 12x17 матрицы отверстий с периодом 250 нм.

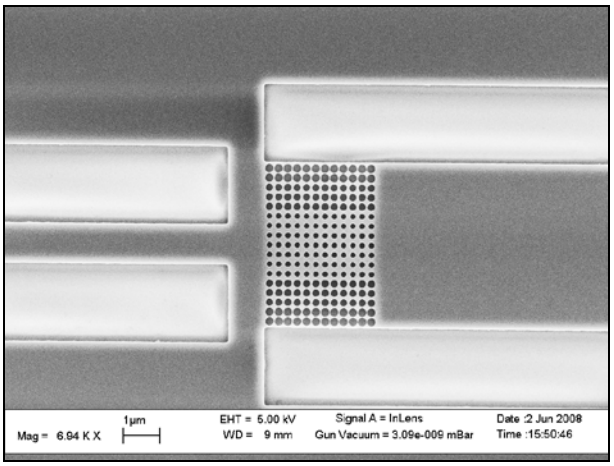

Рис. 5. Фотография изготовленных в пленке кремния двух планарных волноводов, связанных ФК-линзой, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа с увеличением 7000

На рис. 6 показан участок профиля рельефа двух волноводов, изготовленных в пленке кремния на плавленом кварце (а) и участок матрицы отверстий 6x6 ФК-линзы (б), полученные с помощью сканирующего зондового микроскопа.

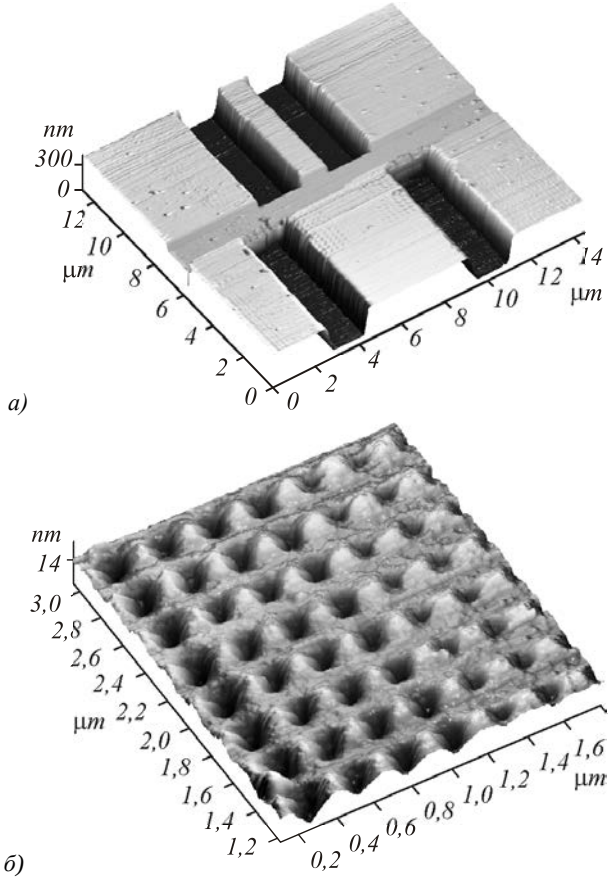

Рис. 6. Профиль рельефа изготовленных 2D волноводов с ФК-линзой, полученный с помощью сканирующего зондового микроскопа (микроскопа на атомных силах) SolverPro (Зеленоград): профиль волноводов (а); участок 6х6 матрицы отверстий ФК-линзы (б). По горизонтальным осям отложены микроны, а по вертикальной оси – нанометры

На рис. 7 показаны сечения выходного (а) и входного (б) волноводов. Видно, что глубина травления обоих волноводов примерно одинаковая и равна 300 нм, а ширина выходного волновода у вершины 1 мкм, а у основания – 2 мкм (рис. 7*а*). Аналогично, ширина входного волновода у вершины 4,5 мкм, а у основания трапеции – 5 мкм (рис. 7*б*).

4. Характеризация двух волноводов с ФК-линзой

На рис. 8 показана оптическая схема для получения спектра пропускания двух планарных волноводов, связанных ФК-линзой. Широкодиапазонный источник света (1450–1700 нм), работающий на основе усиления спонтанной эмиссии, соединен с оптическим волокном.

Свет на выходе из волокна коллимируется и попадает на поляризатор, который выделяет ТЕ-поляризацию. Далее с помощью микрообъектива излучение фокусируется на поверхность входного волновода. Малая часть энергии света попадает в волновод и проходит через исследуемый образец.

На выходе из узкого волновода расположен второй микрообъектив, собирающий свет и фокусирующий его во входной торец многомодового оптического волокна, соединенного с анализатором оптического спектра (АОС). На рис. 9 показан спектр излучения источника, максимум которого в интервале от 1,5 мкм до 1,6 мкм приходится на длину волны 1,55 мкм. Интенсивность излучения дана в произвольных единицах.

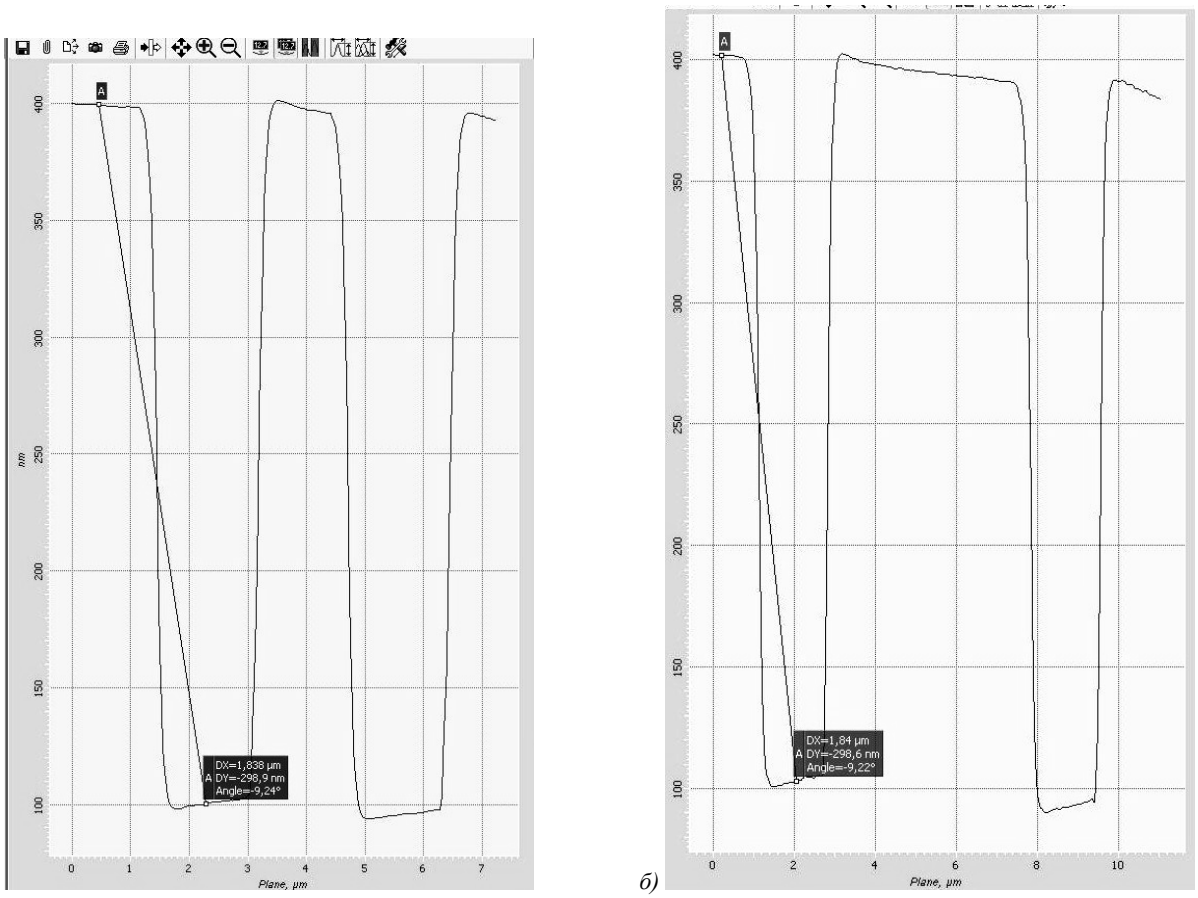

Рис. 7. Сечения профиля рельефа для узкого выходного (а) и широкого входного (б) волноводов

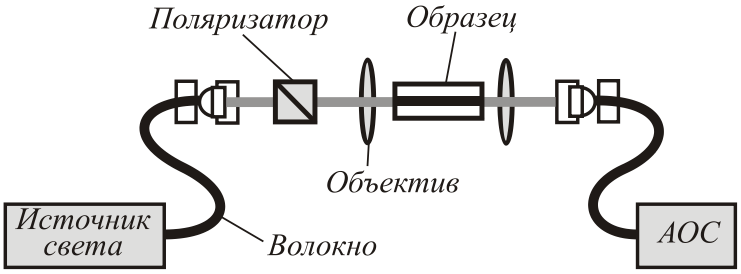

Рис. 8. Оптическая схема для исследования устройства нанофотоники, состоящего из двух волноводов и ФК-линзы

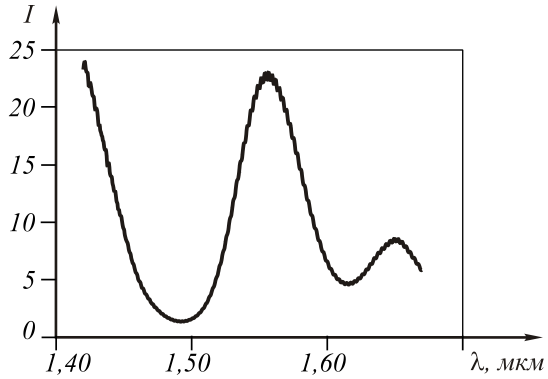

Рис. 9. Спектр излучения источника света, используемого в оптической схеме на рис. 8

На рис. 10 показаны спектры пропускания исследуемых образцов в диапазоне 1,5–1,6 мкм при следующих промежутках Δz между волноводами на оптической оси (а): 0 мкм (кривая 1), 1 мкм (кривая 2) и 3 мкм (кривая 3), а также при следующих величинах смещения Δx с оптической оси выходного волновода (б): 0 мкм (кривая 1), -0,5 мкм (кривая 2), +0,5 мкм (кривая 3), -1 мкм (кривая 4) и +1 мкм (кривая 5). Из рис. 10*а* (кривая 1) видно, что спектр пропускания имеет 4 локальных максимума примерно на длинах волн 1535 нм, 1550 нм, 1565 нм и 1590 нм. Причем два из этих максимумов (на длинах волн 1550 нм и 1565 нм) имеют интенсивность в 3 раза большую, чем два других. Скорее всего, это связано с тем, что спектр излучения источника (рис. 9) в несколько раз слабее излучает на этих длинах волн.

При увеличении осевого расстояния $\Delta z = 1$ мкм между волноводами (рис. 10*а*, кривая 2) спектр пропускания в среднем сохраняет свою структуру, но локальные максимумы уменьшаются по величине и смещаются в «красную» область спектра. При дальнейшем увеличении расстояния $\Delta z = 3$ мкм между волноводами (рис. 10*а*, кривая 3) локальные максимумы не только еще больше уменьшаются, но и приобретают «синее» смещение. «Красное» смещение равно примерно 10 нм, и «синее» смещение тоже -10 нм (для максимума вблизи центральной длины волны – 1,55 мкм). Из рис. 10*б* видно, что при смещении выходного волновода с оптической оси на 1 мкм (кривые 4 или 5) интенсивность на выходе уменьшается в 8 раз (длина волны 1,55 мкм). Это означает, что диаметр фокального пятна, сформированного ФК-линзой в кремнии, меньше 1 мкм.

Для сопоставления эксперимента с теорией было проведено сравнение спектров пропускания. На рис. 11 показаны сглаженный экспериментальный спектр пропускания (а) устройства нанофотоники (рис. 5, но без промежутка) и рассчитанный спектр (б). Из рис. 11 видно, что два максимума спектра в обоих случаях возникают на одних и тех же длинах волн (1535 нм и 1550 нм), третий максимум оказывается сдвинутым на 5 нм, а четвёртого максимума при расчете не возникает. Среднеквадратичное отклонение двух спектров на рис. 11 составило 29%.

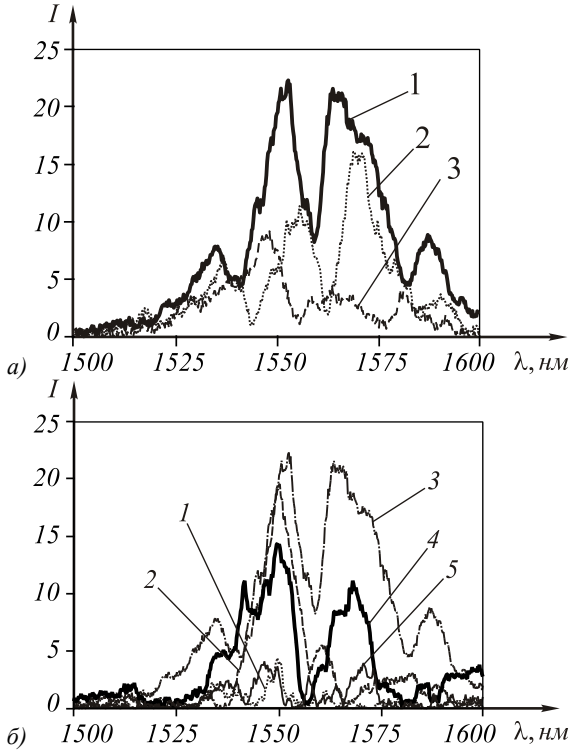

Рис. 10. Спектры пропускания, измеренные с помощью оптической схемы на рис. 8 для исследуемых образцов, показанных на рис. 5, 6 при следующих промежутках между волноводами (а): $\Delta z = 0$ мкм (кривая 1), $\Delta z = 1$ мкм (кривая 2) и $\Delta z = 3$ мкм (кривая 3), а также при следующих смещениях с оптической оси выходного волновода (б): $\Delta x = 0$ мкм (кривая 1), $\Delta x = -0{,}5$ мкм (кривая 2), $\Delta x = +0{,}5$ мкм (кривая 3), $\Delta x = -1$ мкм (кривая 4) и $\Delta x = +1$ мкм (кривая 5)

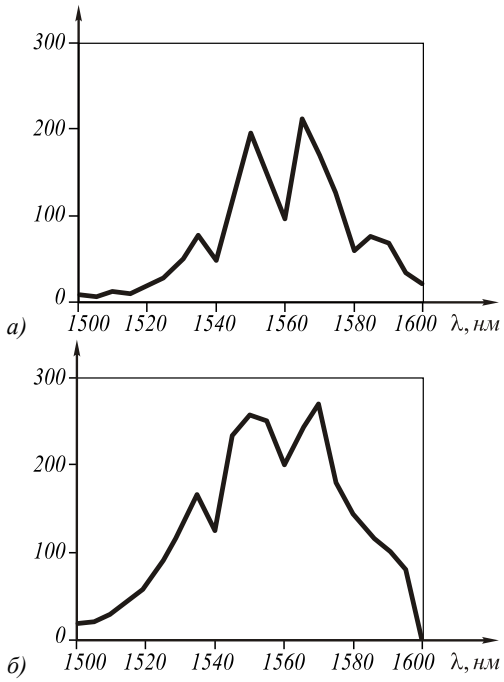

Рис. 11. Сглаженный экспериментальный (а) и расчетный (б) спектры пропускания для двух волноводов с ФК-линзой без промежутков (рис. 5) в диапазоне длин волн 1,5–1,6 мкм. По вертикальной оси – произвольные единицы, по горизонтальной оси – нанометры

Еще одно сравнение теории и эксперимента показано на рис. 12. На этом рисунке показаны зависимости функции пропускания устройства (рис. 5) в произвольных единицах от расстояния Δz между двумя соосными волноводами для длин волн 1550 нм (а) и 1565 нм (б): непрерывной кривой показан расчет, а эксперимент – отдельными точками.

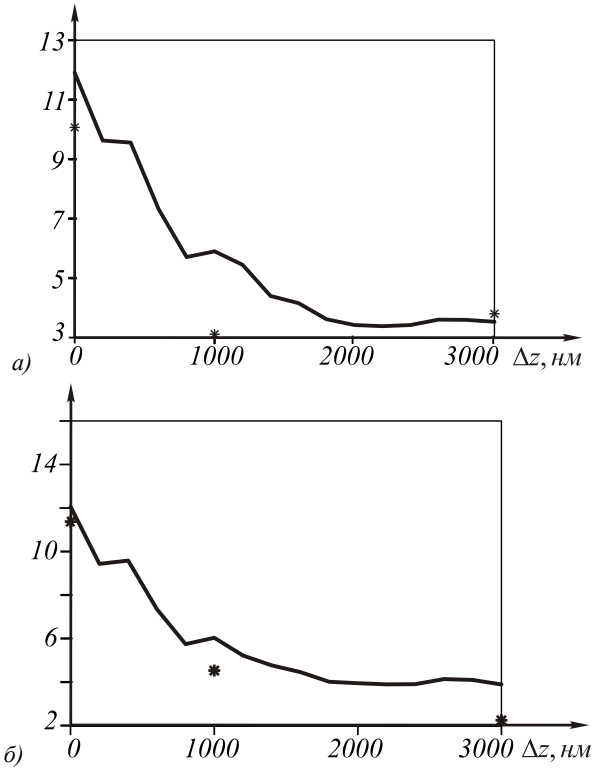

Рис. 12. Зависимости функции пропускания двух волноводов с ФК-линзой от промежутка между ними Δz для длин волн 1550 нм (а) и 1565 нм (б): непрерывная кривая – расчет, отдельные точки – эксперимент. По оси ординат – произвольные единицы

Из рис. 12 видно, что расчет и эксперимент в среднем согласованно отражают уменьшение интенсивности на выходе волновода при увеличении расстояния между волноводами. Заметим, что экспериментальные точки (все кроме одной) лежат ниже расчетной кривой, что обусловлено поглощением света в реальных волноводах длиной 5 мм. Из рис. 12 также следует, что расчетная кривая выходной интенсивности уменьшается в два раза при промежутке между волноводами $\Delta z = 600$ нм, что согласуется с продольным размером фокусного пятна ФК-линзы (рис. 1*в*).

5. Заключение

В работе получены следующие результаты:

- изготовлена двумерная фотонно-кристаллическая линза размером 3x4 мкм в пленке кремния на плавленом кварце, которая расположена на выходе планарного волновода шириной 4,5 мкм и служит для сопряжения с другим планарным волноводом шириной 1 мкм, вход которого находится вблизи фокуса линзы;
- при смещении с оптической оси узкого волновода на 1 мкм интенсивность света на его выходе уменьшается в 8 раз, это означает, что размер фокусного пятна на выходе линзы в кремнии меньше 1 мкм;
- моделирование показало, что максимальное пропускание это устройство имеет на длине волны 1,55 мкм, и эффективность связи двух волноводов -73%;
- измеренный спектр пропускания имеет четыре локальных максимума в диапазоне 1,50–1,60 мкм: 1535 нм, 1550 нм, 1565 нм и 1590 нм; эти максимумы уменьшаются по величине и смещаются в «красную» или «синюю» области спектра при увеличении промежутка между волноводами;
- расчетный спектр пропускания отличается от экспериментального на 29%;
- размер фокусного пятна линзы в воздухе, рассчитанный по полуспаду интенсивности, равен FWHM = 0,32λ, где λ – длина волны, что меньше дифракционного предела, который задается *sinc*-функцией и равен FWHM = 0,44λ, и меньше, чем размер пятна фокусировки, сформированного суперлинзой, которое описывается функцией Бесселя и имеет диаметр FWHM = 0,35λ.

Благодарности

Работа поддержана российско-американской программой «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF RUX0-014-SA-06), Россий-

ским фондом фундаментальных исследований (грант 08-07-99007) и грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3086.2008.9).

Литература

1. Xu, Y. Adiabatic coupling between conventional dielectric waveguides with discrete translational symmetry / Y. Xu, R.K. Lee, A. Yariv // Opt. Lett. 2000.– Vol. 25(10). – P.755-757.
2. Mekis, A. Tapered couplers for efficient interfacing between dielectric and photonic crystal waveguides / A Mekis, J.D. Joannopoulos // J. Light Techn. 2001.– Vol. 19(6). – P.861-865.
3. Happ, T.D. Photonic crystal tapers for ultracompact mode conversion / T.D. Happ, M. Kamp, A. Forchel // Opt. Lett. 2001.– Vol. 26(14). – P.1102-1104.
4. Talneau, A. Low-reflection photonic crystal taper for efficient coupling between guide sections of arbitrary widths / A. Talneau [and other] // Opt. Lett. 2002.– Vol. 27(17). – P.1522-1524.
5. Almeida, V.R. Nanotaper for compact mode conversion / V.R. Almeida, R.R. Panepucci, M. Lipson // Opt. Lett. 2003.– Vol. 28(15). – P.1302-1304.
6. Bienstman, P. Taper structures for coupling into photonic crystal slab waveguides / P. Bienstman [and other] // J. Opt. Soc. Am. B 2003.– Vol. 20(9). – P.1817-1821.
7. MacNab, S.J. Ultra-low loss photonic integrated circit with membrane-type photonic crystal waveguide / S.J. MacNab, N. Moll, Y.A. Vlasov // Opt. Express 2003.– Vol. , v.11, no.22, P.2927-2939.
8. Barclay, P.E. Design of photonic crystal waveguide for evanescent coupling to optical fiber tapers and integration with high-Q cavities / P.E. Barclay, K. Srinivasan, O. Painter // J. Opt. Soc. Am. B 2003.– Vol. , v.20, no. 11, P.2274-2284.
9. Orobtchouk, R. High-efficiency light coupling in a submicrometric silicon-on-insulator waveguide / R. Orobtchouk [and other] // Appl. Opt. 2000.– Vol. 39(31). – P.57-73-5777.
10. Lardenois, S. Low-loss submicrometer silicon-on-insulator rib waveguides and corner mirrors / S. Lardenois [and other] // Opt. Lett. 2003.– Vol. 28(13). – p.1150-1153.
11. Taillaert, D. Grating couplers for couping between optical fiber and nanophotonic waveguides / D. Taillaert [and other] // Jap. J. Appl. Phys. 2006.– Vol. 45(8). – P.6071-6077.
12. Van Laere, F. Compact and high efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic waveguides / F. Van Laere [and other] // J. Light. Techn. 2007.– Vol. 25(1). – P.151-156.
13. Bachim, B.L. Optical fiber-to-waveguide coupling using carbon-dioxide-laser-induced long-period fiber gratings / B.L. Bachim, O.O. Ogunsola, T.K. Gaylord // Opt. Lett. 2005.– Vol. 30(16). – P.2080-2082.
14. Prather, D.W. High-efficiency coupling structure for a single-line-defct photonic crystal waveguide / D.W. Prather [and other] // Opt. Lett. 2002.– Vol. 27(18). – P.1601-1603.
15. Kim, H. High efficiency coupling technique for photonic crystal waveguides using a waveguide lens / H. Kim [and other] // OSA Techn. Digest: Frontiers in optics 2003, MT68.
16. Corbett, J.C.W. Coupling starlight into single-mode photonic crystal fiber using a field lens / J.C.W. Corbett, J.R. Allington-Smith // Opt. Express 2005.– Vol. 13(17). – P.6527-6540.
17. Michaelis, D. Micro-optical assisted high-index waveguide coupling / D. Michaelis [and other] // Appl. Opt. 2006.– Vol. 45(8). – p.1831-1838.
18. Kong, G. Lensed photonic crystal fiber obtained by use of an arc discharge / G. Kong [and other] // Opt. Lett. 2006.– Vol. 31(7). – P.894-896.
19. Pokrovsky, A.L. Lens based on the use of left-handed materials / A.L. Pokrovsky, A.L. Efros // Appl. Opt. 2003.– Vol. 42(28). – P.5701-5705.
20. Fabre, N. Toward focusing using photonic crystal flat lens / N. Fabre [and other] // Opto-electronics Review 2006.– Vol. 14(3). – P.225-232.
21. Li, C. Far-field imagimg by the Veselago lens made of a photonic crystal / C. Li, M. Holt, A.L. Efros // J. Opt. Soc. Am. B 2006.– Vol. 23(3). – P.490-497.
22. Matsumoto, T. Focusing of light by negative refraction in a photonic crystal slab superlens on silicon-on-insulator substrate / T. Matsumoto, K. Eom, T. Baba // Opt. Lett. 2006.– Vol. 31(18). – P.2786-2788.
23. Li, C.Y. Imaging by the Veselago lens based upon a two-dimensional photonic crystal with a triangular lattice / C.Y. Li, J.M. Holt, A.L. Efros // J. Opt. Soc. Am. B 2006.– Vol. 23(5). – P.963-968.
24. Geng, T. All angle negative refraction with the effective phase index of -1 / T. Geng, T. Lin, S. Zhuang // Chinese Opt. Lett. 2007.– Vol. 5(6). – P.361-363.
25. Asatsume, T. Abberation reduction and unique light focusing in a photonic crystal negative refractive lens / T. Asatsume, T. Baba // Opt. Express 2008.– Vol. 16(12). – P.8711-8718.
26. Fabre, N. Measurement of a flat lens focusing in a 2D photonic crystal at optical wavelength / N. Fabre [and other] // OSA Digest, CLEO/QELS 2008, CTuDD6, CA.
27. Yang, S. Focusing concave lens photonic crystals with magnetic materials / S. Yang, C. Hong, H. Yang // J. Opt. Soc. Am. A 2006.– Vol. 23(4). – P.956-959.
28. Luan, P. Photonic crystal lens coupler using negative refraction / P. Luan, K. Chang // Prog. In Electr. Res. 2007.– Vol. 3(1). – P.91-95.
29. Haxha, S. A novel design of photonic crystal lens based on negative refractive index / S. Haxha, F. AbdelMalek // Prog. In Electr. Res. 2008.– Vol. 4(2). – P.296-300.
30. Lu, Z. Three-dimensional photonic crystal flat lens by full 3D negative refraction / Z. Lu [and other] // Opt. Express 2005.– Vol. 13(15). – P.5592-5599.
31. Lu, Z. Experimental demonstration of negative refraction imaging in both amplitude and phase / Z. Lu [and other] // Opt. Express 2005.– Vol. 13(6). – P.2007-2012.
32. Minin, I.V. Subwavelength diffractive photonic crystal lens / I.V. Minin [and other] // Prog. In Electr. Res. B 2008.– Vol. 7. – P.257-264.
33. Pshenay-Severin, E. Photonic crystal lens for photonic crystal waveguide coupling / E. Pshenay-Severin [and other] // OSA Techn. Digest:CLEO 2006, CThK3.
34. Hugonin, J.P. Coupling into clow-mode photonic crystal waveguide / J.P. Hugonin [and other] // Opt. Lett. 2007.– Vol. 32(18). – P.2638-2640.
35. Триандафилов, Я.Р. Фотонно-кристаллическая линза Микаэляна / Я.Р. Триандафилов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика 2007.– Том. 31(3). – С.27-31.
36. Triandafilov, Y.R. Photonic crystal Mikaelian lens / Y.R. Triandafilov, V.V. Kotlyar // Opt. Mem. Neur. Net. 2008.– Vol. 17(1). – P.1-7.

37. Микаэлян, А.Л. Применение свойств среды для фокусирования волн / А.Л. Микаэлян // ДАН СССР 1951.– Том. 81. – С.2406-2415.

PHOTONIC CRYSTAL LENS FOR COUPLING OF TWO PLANAR WAVEGUIDES

V.V. Kotlyar[1,2], Y.R. Triandofilov[2], A.A. Kovalev[1,2], M.I. Kotlyar[1], A.V. Volkov[1,2], B.O. Volodkin[1,2], V.A. Soifer[1,2], Lim O'Faolain[3], T.Krauss[3]

[1] Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia.
[2] S.P. Korolyov Samara State Aerospace University, Samara, Russia.
[3] School of Physics & Astronomy at University of St. Andrews, Great Britain

Abstract

We report design, fabrication and characterization of a new nanophotonic device comprising a two-dimensional photonic crystal (PhC) lens of size 3×4 μm fabricated in a silicon film of fused silica. The PhC lens is put at the output of a planar waveguide of width 4.5 μm to couple light into a planar waveguide of width 1 μm, each waveguide being of length 5 mm. A 1 μm off-axis displacement of the smaller waveguide leads to an 8-fold reduction of output light intensity, which means that the focal spot size at output of the PhC lens in silicon is less than 1 μm. The simulation has shown that the PhC lens has the maximal transmittance at 1.55 μm, with the waveguides coupling efficiency being 73%. The transmission spectrum measured has four local minima in the range 1.50-1.60 μm. The difference between the calculated and measured transmission spectrum is 29%. The focal spot size of the lens in air calculated at the FWHM is 0.32λ (where λ is the wavelength), which is less than the diffraction limit of 0.44 λ, defined by the *sinc*-function.

Key words: photonic crystal lens, planar waveguides, sharp focusing of light, coupling two different waveguides, e-beam lithography.

Citation: Kotlyar VV, Triandofilov YaR, Kovalev AA, Kotlyar MI, Volkov AV, Volodkin BOl, Soifer VA, O'Faolain L, Krauss T. Photonic crystal lens for coupling of two planar waveguides. Computer Optics 2008; 32(4): 326-37.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian-American program "Basic Research and Higher Education" (grant CRDF RUX0-014-SA-06), the Russian Foundation for Basic Research-ments (grant 08-07-99007) and a grant from the President of the Russian Federation for support of leading scientific schools (NSh- 3086.2008.9).

References

[1] Xu Y, Lee RK, Yariv A. Adiabatic coupling between conventional dielectric waveguides with discrete translational symmetry. Opt. Lett. 2000; 25(10): 755-757.
[2] Mekis A, Joannopoulos JD. Tapered couplers for efficient interfacing between dielectric and photonic crystal waveguides. J. Light Techn. 2001; 19(6): 861-865.
[3] Happ TD, Kamp M, Forchel A. Photonic crystal tapers for ultracompact mode conversion. Opt. Lett. 2001; 26(14): 1102-1104.
[4] Talneau A. Low-reflection photonic crystal taper for efficient coupling between guide sections of arbitrary widths. Opt. Lett. 2002; 27(17): 1522-1524.
[5] Almeida VR, Panepucci RR, Lipson M. Nanotaper for compact mode conversion. Opt. Lett. 2003; 28(15): 1302-1304.
[6] Bienstman P. Taper structures for coupling into photonic crystal slab waveguides. J. Opt. Soc. Am. B 2003; 20(9): 1817-1821.
[7] MacNab SJ, Moll N, Vlasov YA. Ultra-low loss photonic integrated circit with membrane-type photonic crystal waveguide. Opt. Express 2003; 11(22): 2927-2939.
[8] Barclay PE, Srinivasan K, Painter O. Design of photonic crystal waveguide for evanescent coupling to optical fiber tapers and integration with high-Q cavities. J. Opt. Soc. Am. B 2003; 20(11): 2274-2284.
[9] Orobtchouk R. High-efficiency light coupling in a submicrometric silicon-on-insulator waveguide. Appl. Opt. 2000; 39(31): 5773- 5777.
[10] Lardenois S. Low-loss submicrometer silicon-on-insulator rib waveguides and corner mirrors. Opt. Lett. 2003; 28(13): 1150-1153.
[11] Taillaert D. Grating couplers for couping between optical fiber and nanophotonic waveguides. Jap. J. Appl. Phys. 2006; 45(8): 6071- 6077.
[12] Van Laere F. Compact and high efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic waveguides. J. Light. Techn. 2007; 25(1): 151-156.
[13] Bachim BL, Ogunsola OO, Gaylord TK. Optical fiber-to-waveguide coupling using carbon-dioxide-laser-induced long-period fiber gratings. Opt. Lett. 2005; 30(16): 2080-2082.
[14] Prather DW. High-efficiency coupling structure for a single-line-defct photonic crystal waveguide. Opt. Lett. 2002; 27(18): 1601-1603.
[15] Kim H. High efficiency coupling technique for photonic crystal waveguides using a waveguide lens. OSA Techn. Digest: Frontiers in optics 2003; MT68.
[16] Corbett JCW, Allington-Smith JR. Coupling starlight into single-mode photonic crystal fiber using a field lens. Opt. Express 2005; 13(17): 6527-6540.
[17] Michaelis D. Micro-optical assisted high-index waveguide coupling. Appl. Opt. 2006; 45(8): 1831-1838.

[18] Kong G. Lensed photonic crystal fiber obtained by use of an arc discharge. Opt. Lett. 2006; 31(7): 894-896.
[19] Pokrovsky AL, Efros AL. Lens based on the use of left-handed materials. Appl. Opt. 2003; 42(28): 5701-5705.
[20] Fabre N. Toward focusing using photonic crystal flat lens. Opto-electronics Review 2006; 14(3): 225-232.
[21] Li C, Efros AL. Far-field imagimg by the Veselago lens made of a photonic crystal. J. Opt. Soc. Am. B 2006; 23(3): 490-497.
[22] Matsumoto T, Eom K, Baba T. Focusing of light by negative refraction in a photonic crystal slab superlens on silicon-on-insulator substrate. Opt. Lett. 2006; 31(18): 2786-2788.
[23] Li CY, Holt JM, Efros AL. Imaging by the Veselago lens based upon a twodimensional photonic crystal with a triangular lattice. J. Opt. Soc. Am. B 2006; 23(5); 963-968.
[24] Geng T, Lin T, Zhuang S. All angle negative refraction with the effective phase index of -1. Chinese Opt. Lett. 2007; 5(6): 361-363.
[25] Asatsume T, Baba T. Abberation reduction and unique light focusing in a photonic crystal negative refractive lens. Opt. Express 2008; 16(12): 8711-8718.
[26] Fabre N. Measurement of a flat lens focusing in a 2D photonic crystal at optical wavelength. OSA Digest, CLEO/QELS 2008; CTuDD6, CA.
[27] Yang S, Hong C, Yang H. Focusing concave lens photonic crystals with magnetic materials. J. Opt. Soc. Am. A 2006; 23(4): 956-959.
[28] Luan P, Chang K. Photonic crystal lens coupler using negative refraction. Prog. In Electr. Res. 2007; 3(1): 91-95.
[29] Haxha S, AbdelMalek F. A novel design of photonic crystal lens based on negative refractive index. Prog. In Electr. Res. 2008; 4(2): 296-300.
[30] Lu Z. Three-dimensional photonic crystal flat lens by full 3D negative refraction. Opt. Express 2005; 13(15): 5592-5599.
[31] Lu Z. Experimental demonstration of negative refraction imaging in both amplitude and phase. Opt. Express 2005; 13(6): 2007-2012.
[32] Minin IV. Subwavelength diffractive photonic crystal lens. Prog. In Electr. Res. B 2008; 7: 257-264.
[33] Pshenay-Severin E. Photonic crystal lens for photonic crystal waveguide coupling. OSA Techn. Digest:CLEO 2006; CThK3.
[34] Hugonin JP. Coupling into clow-mode photonic crystal waveguide. Opt. Lett. 2007; 32(18): 2638-2640.
[35] Triandafilov YR, Kotlyar VV. Photonic crystal Michaelian lens [In Russian]. Computer Optics 2007; 31(3): 27-31.
[36] Triandafilov YR, Kotlyar VV. Photonic crystal Mikaelian lens. Opt. Mem. Neur. Net. 2008; 17(1): 1-7.
[37] Michaelian AL. Application of medium properties for wave focusing [In Russian]. Doklady AN SSSR 1951; 81: 2406-2415.