

ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО УСТРОЙСТВА НАНОФОТОНИКИ ДЛЯ ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАНАРНЫЙ ВОЛНОВОД

А.Г. Налимов, А.А. Ковалев, В.В. Котляр, В.А. Соифер

*Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева*

Аннотация

С помощью программы FullWAVE (www.rsoftdesign.com), в которой реализован разностный FDTD-метод решения уравнений Максвелла, промоделировано трехмерное устройство нанофотоники, состоящее из субволновой дифракционной решетки, широкого и узкого планарных волноводов и фотонно-кристаллической линзы Микаэляна, расположенных в тонкой пленке кремния на подложке из трех периодов зеркала Брегга, каждый период которого состоит из слоя кремния и плавленного кварца. Устройство предназначено для ввода лазерного пучка с фокусным пятном $3 \times 4,6 \text{ мкм}^2$ с длиной волны $1,55 \text{ мкм}$ в узкий планарный волновод шириной 500 нм , что приводит к «сжатию» площади сечения входного пучка в 125 раз. Моделирование показало, что эффективность устройства равна 32% от энергии сфокусированного на решетку линейно поляризованного эллиптического гауссова пучка и 52%, если решетку осветить участком плоской волны. Для сравнения, если вводить свет в это же устройство, но без решетки, а фокусируя свет на торец кремниевой пленки широкого волновода, то эффективность будет равна только 8%.

Ключевые слова: FDTD-метод, фотонно-кристаллическая линза, сопряжение двух волноводов, ввод излучения в волновод, зеркало Брегга, нанофотоника.

1. Введение

Для решения задач нанофотоники, которые имеют место в телекоммуникационных технологиях, многие устройства реализуются с помощью планарной технологии кремний-на-изоляторе, аналогично интегральным электронным чипам [1]. При этом свет распространяется в проволочных световодах с шириной 450 нм , выполненных на пленке кремния толщиной 220 нм , или проходит через 2D фотонно-кристаллический волновод шириной $300\text{-}500 \text{ нм}$. Свет доставляется к устройствам нанофотоники с помощью одномодового волокна, диаметр сечения которого равен 9 мкм . Поэтому, если просто прислонить торец волокна к торцу планарного волновода, то в него войдет около $0,1\%$ световой энергии моды волокна. Поэтому обычно на пленке кремния делают одномерную субволновую дифракционную решетку с периодом $580\text{-}600 \text{ нм}$ и глубиной канавок около 50 нм , площадь решетки $10 \times 10 \text{ мкм}$ [2]. Двумерное моделирование такой бинарной решетки на кремнии с подложкой из кварца дает эффективность 28% [2]. Известны наклонные решетки на индий-фосфате, у которых теоретическая эффективность достигает 59%, а эксперимент показал 30% [3]. В [4] используется дополнительная линза для фокусировки выходящего из волокна излучения на дифракционную решетку. При этом расчетная эффективность (2D моделирование) ввода была 67,6%, а экспериментальная – только 28%. Структура в [4] была с антиотражающим покрытием. Если в промежуток между слоями кварца и кремния напылить тонкую пленку золота (зеркало), то эффективность ввода увеличивается до 72% [5]. В этой же работе была

создана такая решетка в широком планарном волноводе из кремния. Эксперимент показал, что эффективность такого устройства была равна около 70%, что хорошо согласуется с расчетом.

Однако ввести излучение в широкий волновод (ширина около 10 мкм или около 4 мкм , если использовать линзу для фокусировки) – это только часть задачи. Другая ее часть заключается в сопряжении моды широкого волновода с модой узкого волновода. Для такого сопряжения можно использовать либо планарные тейперы (сужающиеся волноводы) [6], либо планарные фотонно-кристаллические линзы [7-10]. Недостатком сужающихся волноводов является относительно большая их длина $30\text{-}130 \text{ мкм}$. Рассмотрим подробнее методы ФК-линз. В [7] с помощью 2D-моделирования FDTD-методом исследовались ФК-линзы для длины волны $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ на кремнии из $N \times M = 25 \times 8$ отверстий с периодом $a = 0,28\lambda$, радиусы отверстий увеличивались от оси линзы ($r = 0,27a$) к периферии ($r = 0,39a$). Показано, что на фокусном расстоянии $28,6a$ для линзы толщиной $9a$, освещенной гауссовым пучком с диаметром перетяжки $25a$, получается фокусное пятно, диаметр которого по полуспаду интенсивности равен $\text{FWHM} = 0,54\lambda$. Моделирование также показало, что эффективность ввода, если в области фокуса разместить планарный волновод шириной $2a$, будет равна 60%.

В [8] аналогично [7] моделировалась 2D ФК-линза, сформированная в кремнии ($n = 3,46$) с помощью периодических отверстий (период a) с радиусами $r(x)$ от $0,25a$ до $0,40a$. Особенностью этой линзы является то, что радиусы растут от оси к пе-

риферии линзы по закону $r(x) \sim x^{1.4}$. Именно при таком законе роста наблюдается наименьший размер фокусного пятна $\text{FWHM} = 1,27\lambda$. При этом линза освещалась гауссовым пучком диаметром $26a$, фокусное расстояние было $10a$, а период решетки отверстий был равен $a = 0,26\lambda$. В работе [8] также показано, что хроматическая аберрация ФК-линзы такая же по знаку, как и у дифракционной решетки: фокусное расстояние растет с ростом частоты света.

Моделирование в [7, 8] было проведено для TE -поляризации (электрический вектор E был в плоскости ФК-линзы). В [9, 10] рассмотрена ФК-линза Микаэляна, которая отличается от ФК-линз в [7, 8] тем, что фокусирует свет вблизи своей поверхности, и поэтому, во-первых, с помощью такой линзы можно формировать безабберационное фокусное пятно с диаметром, меньшим, чем дифракционный предел (так как в формировании фокусного пятна принимают участие поверхностные волны), а во-вторых, узкий сопрягаемый волновод можно приблизить вплотную к линзе.

В данной работе приводятся результаты трехмерного моделирования полного устройства сопряжения, включающего и решетку для ввода сфокусированного гауссова пучка в широкий планарный волновод, и ФК-линзу Микаэляна для согласования мод широкого и узкого волноводов. В работе с помощью программы FullWAVE показано, что эффективность такого устройства нанопотоники составляет 32%, и при этом происходит «сжатие» площади сечения гауссова пучка ($3 \times 4,6$ мкм) в площадь моды узкого волокна ($0,22 \times 0,5$ мкм) в 125 раз. Если осветить дифракционную решетку участком плоской волны, то эффективность повышается до 52%. Причем эффективность ввода решеткой сфокусированного гауссова пучка в широкий планарный волновод равна 62,5%, а эффективность сопряжения широкого (4,6 мкм) и узкого (0,5 мкм) волноводов с помощью ФК-линзы Микаэляна равна 46%. Для плоской волны две последние цифры увеличиваются соответственно – 78% и 67%.

2. Двумерное моделирование ввода света в планарный волновод с помощью решетки

На рис. 1 показана 2D-схема ввода света в тонкий планарный волновод с бинарной решеткой (ширина штрихов равна ширине канавок) на тонкой подложке. Вдоль оси Y волновод, штрихи решетки и подложка имеют неограниченные размеры. Подложка имеет многослойную структуру (3 периода зеркала Брегга) для увеличения эффективности ввода света в волновод. Параметры структуры на рис. 1 подобраны квазиоптимальным образом путем перебора. Материалы выбраны согласно широко применяемой технологии кремний-на-диэлектрике.

Волновод был из кремния (Si) с показателем преломления $n_1 = 3,479$ для длины волны света $\lambda = 1,57$ мкм, толщиной $h = 220$ мкм на кварце (SiO_2) с показателем преломления $n_2 = 1,44$ и шириной

$W_1 = 1,03$ мкм. Далее в подложке опять идет слой кремния шириной $W_2 = 0,55$ мкм. Эти два слоя в подложке (кремний + кварц) толщиной $W_1 + W_2$ повторяются еще два раза. При добавлении четвертого периода такого зеркала Брегга эффективность ввода света в волновод не увеличивалась. На пленке кремния имеется субволновая поверхностная бинарная дифракционная решетка с периодом $T = 750$ нм, глубина канавок решетки $D = 90$ нм. Рабочая длина решетки 7-8 периодов. Свет в виде цилиндрического гауссова пучка TM -поляризации (вектор электрического поля направлен вдоль штрихов решетки и вдоль оси Y , при TE -поляризации свет почти не вводится в волновод). Радиус гауссова пучка по оси Z равен $b = 3$ мкм. Центр пережатки гауссова пучка расположен на расстоянии от решетки (по оси X) $d_1 = 2,78$ мкм и на расстоянии от края решетки (по оси Z) $d_2 = 4,15$ мкм. Угол падения лазерного пучка на решетку $\alpha = 34^\circ$.

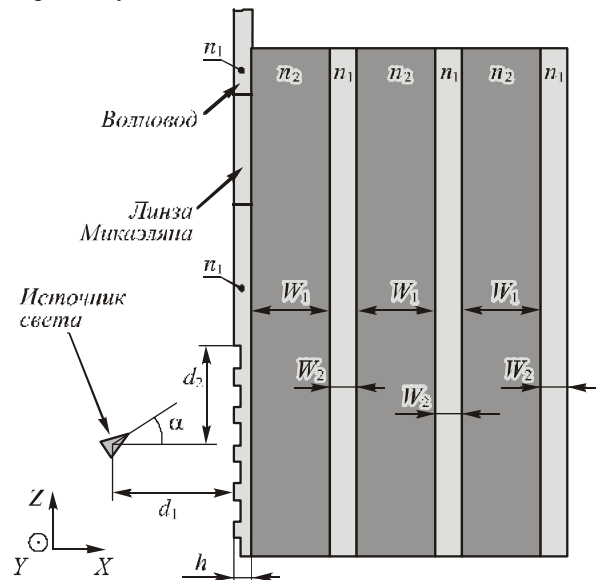


Рис. 1. Двумерная схема ввода света TM -поляризации ($E_y \neq 0$) в кремниевый волновод с помощью бинарной поверхностной субволновой дифракционной решетки

Моделирование проводилось программой FullWAVE 6.0 (фирмы RSoft, США), в которой реализован разностный FDTD-метод решения системы уравнений Максвелла. В нашем случае при приведенных выше параметрах эффективность ввода света в волновод с помощью решетки составила $\eta = 66,3\%$. Под эффективностью здесь понимается отношение мощности (или суммарной интенсивности) моды волновода к мощности гауссова пучка, умноженное на 100%.

Моделирование в этой работе проводилось при следующих параметрах сетки: шаги по осям X и Y были равны $\lambda / 87$, шаг по продольной оси Z был равен $\lambda / 78$, а шаг по временной шкале выбирался равным $cT / 196$, где c – скорость света в вакууме, T – период колебаний световой волны. Толщина поглощающего слоя со всех сторон области расчета

была равна 0,5 мкм. В Таблице 1 приведена зависимость эффективности ввода от шагов дискретизации. Видно, что при выбранных значениях полученная эффективность устойчива к изменениям сетки (предпоследняя строка Таблицы 1).

Таблица 1. Зависимость эффективности ввода света в волновод от выбранных параметров сетки

| Δx | Δz | Δt | $\eta, \%$ |
|-----------------|-----------------|------------|------------|
| $\lambda / 20$ | $\lambda / 20$ | $cT / 64$ | 22 |
| $\lambda / 30$ | $\lambda / 30$ | $cT / 80$ | 52 |
| $\lambda / 40$ | $\lambda / 40$ | $cT / 80$ | 63 |
| $\lambda / 50$ | $\lambda / 50$ | $cT / 100$ | 65 |
| $\lambda / 87$ | $\lambda / 78$ | $cT / 196$ | 66,3 |
| $\lambda / 100$ | $\lambda / 100$ | $cT / 200$ | 67 |

На рис. 2 показана зависимость эффективности η от толщины слоя кварца W_1 в подложке – зеркале Брегга на рис. 1. Из рис. 2 видно, что имеют место резонансные (узкие) пики отражения (как в зеркале Брегга или 1D фотонном кристалле) при $W_1 = 0,47$ мкм, 1,03 мкм и 1,6 мкм. Максимальная эффективность достигается при $W_1 = 1,03$ мкм.

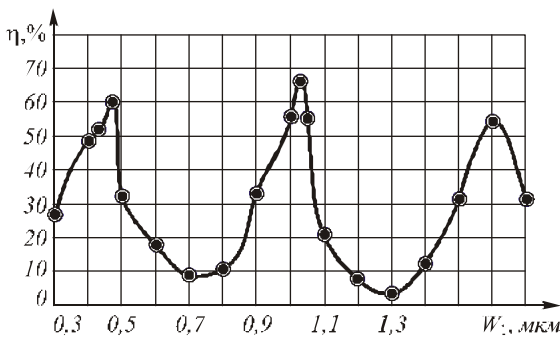


Рис. 2. Зависимость эффективности η ввода в 2D волновод от толщины слоя кремния W_1 в подложке

На рис. 3 показан результат моделирования ввода света в 2D волновод: показана мгновенная картина амплитуды электрического поля $E_y(x, z)$. Из рис. 3 видно, что гауссовый пучок затухает при прохождении внутрь подложки и за три периода зеркала Брегга почти не проникает. Зеркало Брегга работает, так же как антиотражающее покрытие, и поэтому гауссов пучок почти не отражается от решетки, а эффективно вводится в пленку кремния.

На рис. 4 показана зависимость эффективности ввода сфокусированного гауссова пучка в волновод в 3D случае при увеличении толщины h_2 волновода (рис. 1) вдоль оси Y. Из рис. 4 видно, что при толщине волновода и решетки $h_2 = 4,6$ мкм достигается эффективность $\eta = 60\%$, а при толщине $h_2 = 8$ мкм эффективность ввода $\eta = 65\%$ будет немного меньше, чем эффективность в 2D случае $\eta = 66,3\%$. Дальнейшее увеличение толщины h_2 устройства (рис. 1) не моделировалось из-за ограниченного объема оперативной памяти компьютера. Таким образом, 3D моделирование с помощью программы FullWAVE показало, что 60% световой энергии сфокусированного на

решетку гауссова пучка (площадь перетяжки $3 \times 4,6$ мкм) можно ввести в планарный кремниевый волновод (рис. 1) шириной 4,6 мкм.

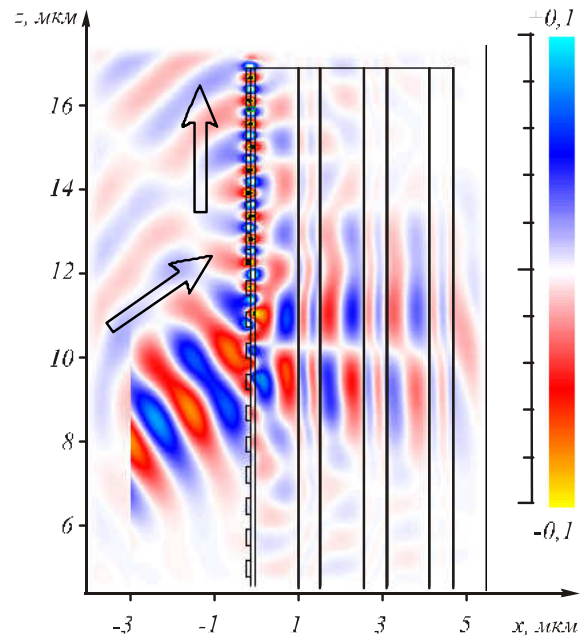


Рис. 3. Мгновенное распределение амплитуды $E_y(x, z)$ (стрелками показано направление распространения света)

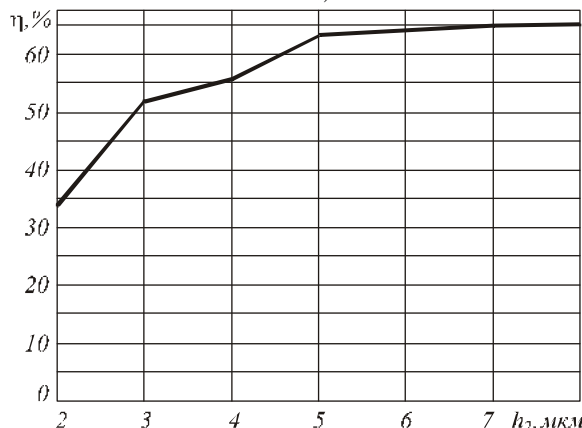


Рис. 4. Зависимость эффективности η ввода в 3D волновод от толщины волновода h_2 в третьем измерении вдоль оси Y

3. Трёхмерное моделирование фотонно-кристаллической линзы Микаэляна для сопряжения двух волноводов

В [10] была промоделирована 2D ФК-линза Микаэляна, соединяющая два планарных волновода в кремнии толщиной 5 мкм и 0,5 мкм. Эффективность связи была равна $\eta = 45\%$. В этом разделе приводятся результаты трёхмерного моделирования аналогичного устройства нанофотоники.

На рис. 5 показана схема планарных волноводов, сопряженных с помощью ФК-линзы. Ширина входного волновода – 4,6 мкм, выходного – 0,5 мкм, толщина пленки кремния – 220 нм, показатель преломления $n = 3,47$ для длины волны $\lambda = 1,55$ мкм, коли-

чество отверстий – 12×17 , диаметр отверстий от 186 нм на оси линзы до 240 нм на периферии, период решетки отверстий – 250 нм. Подложка из кварца с показателем преломления 1,44 и имеет толщину 1 мкм. На вход широкого волновода подавался TE -поляризованный свет (электрический вектор E лежит в плоскости ФК-линзы) эллиптического гауссова лазерного пучка с радиусами по осям X и Y 4,6 мкм и 0,22 мкм. Полная 3D область расчета программой FullWAVE была равна $X \times Y \times Z = 6 \times 3,1 \times 9$ мкм³. Расчет составляющих электромагнитного поля для устройства нанопотоники, показанного на рис. 5, занял примерно 18 минут на процессоре Intel® Celeron®, 3,06 ГГц, ОЗУ 512 Мб.

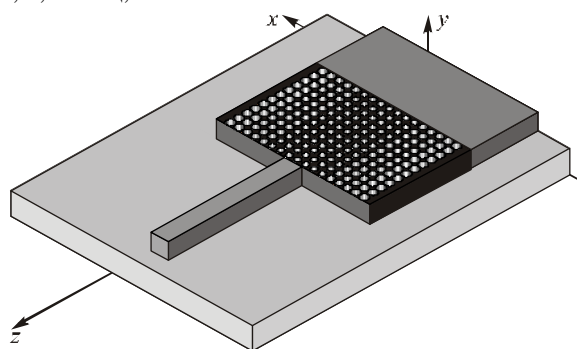


Рис. 5. 3D схема двух планарных кремниевых волноводов (темно-серый), сопряженных ФК-линзой (черный) на подложке из кварца (светло-серый)

Эффективность связи между двумя волноводами (рис. 5) составила $\eta = 46\%$. Это почти совпадает с эффективностью в двумерном случае [10]. В обоих случаях, в этой работе и в [10], Френелевское отражение не учитывалось. Такое совпадение результатов говорит о том, что трехслойная подложка подобрана так, что свет почти не покидает волноводы и линзу в направлениях «вверх» и «вниз» по оси Y , а только отражается от границ раздела сред и уходит из линзы мимо волновода в плоскости XZ , как и в двумерном случае.

Если заменить гауссов пучок на участок плоской волны площадью $4,6 \times 0,22$ мкм², которая освещает торец входного волновода, то эффективность связи (без учета Френелевского отражения от торца волновода) возрастает до 67%. Такое увеличение эффективности связи объясняется тем, что плоская волна фокусируется линзой Микаэляна в пятно меньшего диаметра, чем гауссовый пучок такого же размера. А фокусное пятно меньшего диаметра эффективней «переходит» в моду узкого волновода.

На рис. 6 показан результат моделирования устройства нанопотоники, показанного на рис. 5, при освещении широкого волновода гауссовым пучком с перетяжкой $4,6 \times 0,22$ мкм².

Из рис. 6, на котором показано мгновенное распределение амплитуды $E_x(x, y, z)$, видно, что свет распространяется внутри волновода и за его границы (в подложку) выходит только малая часть световой энергии. Большая часть из потерянной энергии

отражается от границы ФК-линзы и уходит назад в широкий волновод. Видно также, что в узком волноводе потери (уход света в подложку) больше, чем в широком.

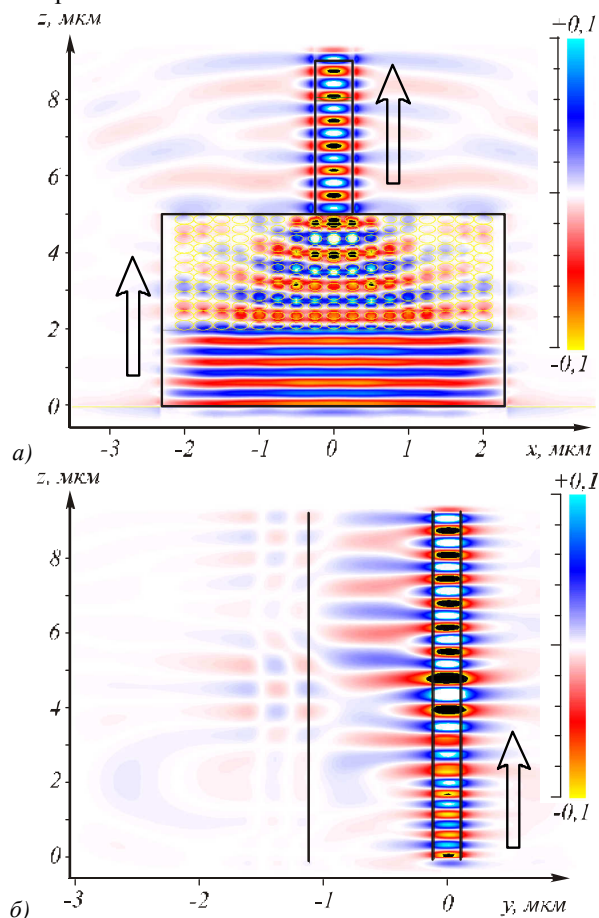


Рис. 6. Мгновенное распределение амплитуды $E_x(x, y, z)$ в плоскости ZX (а) и плоскости ZY (б), вертикальная линия (б) показывает границу подложки, стрелками показано направление распространения света

4. Трехмерное моделирование всего устройства нанопотоники

На рис. 7 показана 3D схема всего устройства нанопотоники, которое включает решетку, ФК-линзу Микаэляна и два сопрягаемых планарных волновода. На подложке (три периода зеркала Брегга) из кремния и кварца расположена тонкая пленка (толщиной 220 нм) кремния шириной $h_2 = 4,6$ мкм в области поверхностной решетки, линзы и широкого волновода и шириной $s = 0,5$ мкм в области выходного узкого волновода. Длина всего устройства 17 мкм. Для ФК-линзы $l_m = 3$ мкм, промежуток волновода между решеткой и линзой $l = 4$ мкм (величина этого участка не сильно влияет на эффективность, и его длину можно менять). На устройство (рис. 7) под углом 34° в области решетки падает эллиптический гауссов пучок с линейной поляризацией (электрический вектор имеет только одну проекцию E_x) с площадью перетяжки $3 \times 4,6$ мкм² (в этом случае эффективность максимальная).

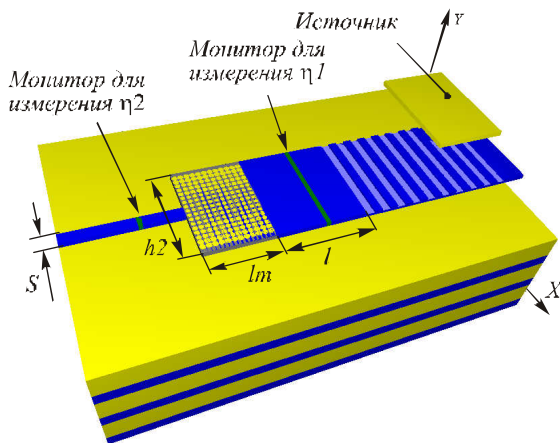


Рис. 7. Схема всего устройства нанофотоники, включающего решетку, широкий волновод, ФК-линзу, узкий волновод и подложку – зеркало Брегга

На рис. 8 показано мгновенное распределение амплитуды электрического поля $E_x(x, y, z)$ в плоскости ZY (а) и плоскости ZX (б).

Из рис. 8 видно, что свет проходит в подложку под решеткой, а под волноводом и линзой почти не рассеивается в подложку.

Эффективность ввода света в волновод решеткой (рассчитанная в широком волноводе после решетки) составила $\eta_1 = 62,5\%$ от полной световой мощности гауссова пучка (в этот раз эффективность дана с учетом и Френелевского отражения от решетки), а эффективность всего устройства (рассчитанная на выходе узкого волновода) равна $\eta_2 = 32\%$. Если то же устройство (рис. 7) осветить участком плоской линейно-поляризованной волны с площадью сечения $3 \times 4,6 \text{ мкм}^2$, то эффективность увеличивается: $\eta_1 = 78\%$ и $\eta_2 = 52\%$. Заметим для сравнения, что если сфокусировать тот же гауссов пучок на торец широкого волновода устройства на рис. 5 (без решетки), то эффективность будет всего $\eta = 8\%$.

5. Заключение

В работе получен следующий результат. Строгое трехмерное моделирование с помощью программы FullWAVE нового устройства нанофотоники, содержащего субволновую бинарную дифракционную решетку с периодом 750 нм, планарные широкий волновод (4,6 мкм) и узкий волновод (0,5 мкм), связанные ФК-линзой Микаэляна (размер линзы $3 \times 4,6 \text{ мкм}^2$, матрица отверстий 12×17 с периодом 250 нм), выполненных на пленке кремния толщиной 220 нм, нанесенной на поверхность подложки, состоящей из трех периодов зеркала Брегга (слои кремния и кварца с периодом 1,58 мкм), показало, что при фокусировке под углом 34° на решетку гауссова эллиптического пучка с TE-поляризацией (сечение перетяжки $3 \times 4,6 \text{ мкм}$), эффективность всего устройства равна 32%, что в 4 раза больше, чем при фокусировке того же гауссова пучка на торец широкого волновода без дифракционной решетки.

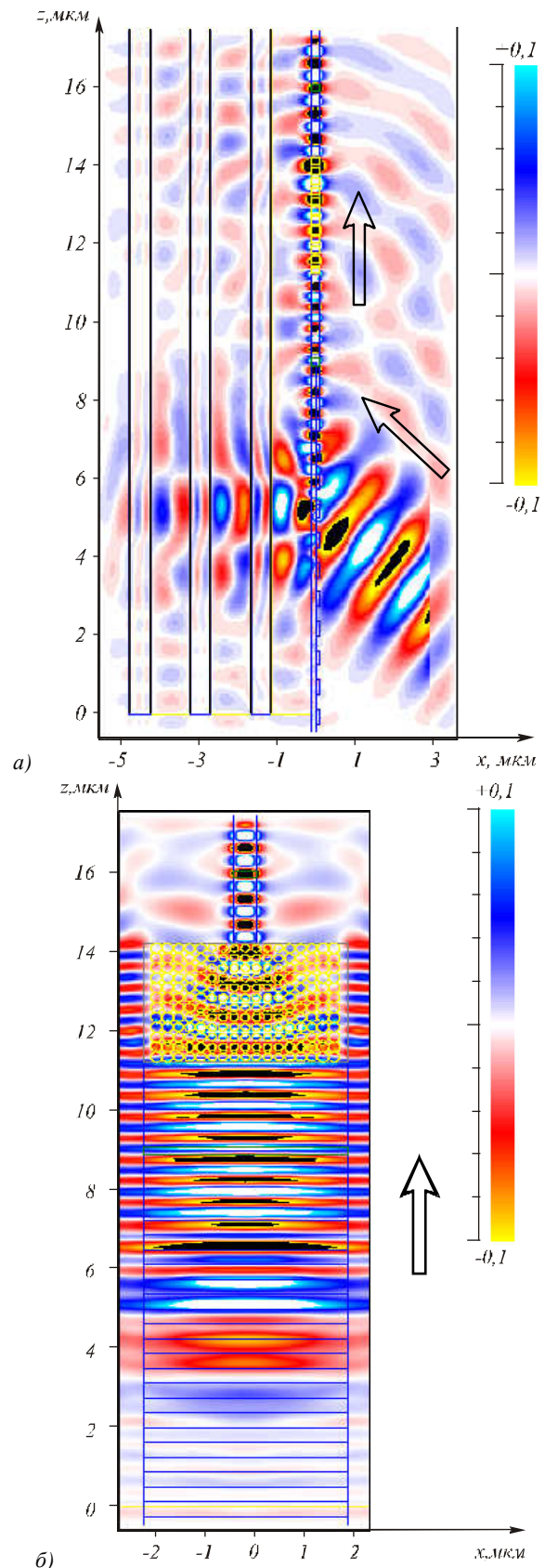


Рис. 8. Мгновенное распределение амплитуды электрического поля $E_x(x, y, z)$ для всего устройства: в плоскости ZY (а) и плоскости ZX (б), стрелками показано направление распространения света

Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1 и Y4-P-14-04), гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3086.2008.9) и грантов РФФИ 08-07-99007, 09-07-0000, 09-07-00145.

Литература

1. **Bogaerts, W.** Nanophotonic waveguides and photonic crystal in Silicon-on-Insulator, / W. Bogaerts, //PhD Thesis, Universitet of Gent, Netherlands, -2003.
2. **Taillaert, D.** An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers / D. Taillaert [and other] // IEEE J. Quantum Electron. - 2002. - Vol.38(7). - P. 949-955.
3. **Van Laere, F.** Compact Slanted Grating Couplers Between Optical Fiber and InP-InGaAsP Waveguides / F. Van Laere [and other] // IEEE Phot. Techn. Lett. - 2007. - Vol. 19(6). - P. 396-398.
4. **Orobtchouk, R.** High-Efficiency Light Coupling in a Submicrometric Silicon-on-Insulator Waveguide / R. Orobtchouk [and other] // Appl. Opt. -2000. - Vol. 39(31). -P. 5773-5777.
5. **Van Laere, F.** Compact and Highly Efficient Grating Couplers Between Optical Fiber and Nanophotonic Waveguides / F. Van Laere [and other] // J. Lightwave Technol. -2007. - Vol. 25(1). - P. 151-156.
6. **Spuhler, M.M.** A Very Short Planar Silica Spot-Size Converter Using a Nonperiodic Segmented Waveguide / M.M. Spuhler [and other] // J. Lightwave Technol. - 1998. - Vol. 16(9). - P. 1680-1685.
7. **Chien, H.** Focusing of electromagnetic waves by periodic arrays of air holes with gradually varying radii / H. Chien, C. Chen // Opt. Express -2006. - Vol. 14(22). - P. 10759-10764.
8. **Wu, Q.** Graded negative index lens by photonic crystals / Q. Wu, J.M. Gibbons, W. Park // Opt. Express. -2008. - Vol. 16(21). -P. 16941-16949.
9. **Триандафилов, Я.Р.** Фотонно-кристаллическая линза Микаэляна / Я.Р. Триандафилов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. -2007. - Т. 31, № 3. - С. 27-31.
10. **Котляр, В.В.** Фотонно-кристаллическая линза для сопряжения двух планарных волноводов / В.В. Котляр [и др.] // Компьютерная оптика. -2008. - Т. 32, № 4. - С. 326-336.

В редакцию поступила 12.02.2009г.

SIMULATION OF 3D NANOPHOTONICS DEVICE FOR COUPLING LIGHT INTO PLANAR WAVEGUIDE

Anton Gennadyevich Nalimov^{1,2} (researcher, e-mail: anton@smr.ru),
Alexey Andreevich Kovalev^{1,2} (researcher, e-mail: alanko@smr.ru),
Victor Victorovich Kotlyar^{1,2} (head of laboratory, e-mail: kotlyar@smr.ru),
Victor Alexandrovich Soifer^{1,2} (director, e-mail: ipsi@smr.ru)

¹ Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences,
²S.P. Korolyov Samara State Aerospace University

Abstract

Using the FullWAVE software (www.rsoftdesign.com) for solving Maxwell's equations by the finite-difference FDTD-method, we simulate the performance of a three-dimensional nanophotonics device comprising a subwavelength diffraction grating, a wide and a narrow planar waveguide, and a photonic crystal (PhC) Mikaelian lens located in a thin silicon film coated on a substrate containing a three-period Bragg mirror, with each period made up of silicon + silica layer. The device is intended to couple a laser beam with the focal spot of $3 \times 4.6 \mu\text{m}^2$ and wavelength $1.55 \mu\text{m}$ into a planar waveguide of width 500 nm, resulting in a 125-fold "compression" of the input beam cross-section. The simulation has shown that the coupling efficiency amounts to 32% of the energy of the linearly polarized elliptic Gaussian beam focused onto the grating and 52% when a plane wave segment is incident onto the grating. For comparison, the grating-unaided coupling of light into the same device by the butt-coupling of light into the wide waveguide's silicon film gives the efficiency as low as 8%.

Key words: FDTD-method, photonic crystal lens, coupling two different waveguides, input light into waveguide, Bragg mirror, nanophotonics.

Citation: Nalimov AG, Kovalev AA, Kotlyar VV, Soifer VA. Simulation of 3D nanophotonics device for coupling light into planar waveguide. *Computer Optics* 2009; 33(1): 4-9.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian-American program "Basic Research-follow and Higher Education" (grant CRDF PG08-014-1 and Y4-P-14-04), the grant of the President of the Russian Federation for support of leading scientific schools (NSH-3086.2008.9) and RFBR grants 08-07-99007, 09-07-0000, 09-07-00145.

References

- [1] Bogaerts W. Nanophotonic waveguides and photonic crystal in Silicon-on-Insulator. Netherlands: PhD Thesis. Universitet of Gent; 2003.
- [2] Taillaert D, Bogaerts W, Bienstman P, Krauss TF, Van DP, Moerman I, Verstuyft S, De Mesel K, Baets R. An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers. *IEEE J. Quantum Electron* 2002; 38(7): 949-55.
- [3] Van Laere F, Kotlyar MV, Taillaert D, Van Thourhout, D, Krauss TF, Baets R. Compact Slanted Grating Couplers Between Optical Fiber and InP-InGaAsP Waveguides. *IEEE Phot Techn Lett* 2007; 19(6): 396-98.
- [4] Orobtschouk R, Layadi A, Gualous H, Pascal D, Koster A, Laval S. High-Efficiency Light Coupling in a Submicrometric Silicon-on-Insulator Waveguide. *Appl Opt* 2000; 39(31): 5773-7.
- [5] Van Laere F, Roelkens G, Ayre M, Schrauwen J, Taillaert D, Van Thourhout D, Krauss TF, Baets R. Compact and Highly Efficient Grating Couplers Between Optical Fiber and Nanophotonic Waveguides. *J. Lightwave Technol* 2007; 25 (1): 151-6.
- [6] Spuhler MM, Offrein BJ, Bona GL, Germann R, Massarek I, Erni D. A Very Short Planar Silica Spot-Size Converter Using a Nonperiodic Segmented Waveguide. *J. Lightwave Technol* 1998; 16(9): 1680-5.
- [7] Chien HT, Chen CC. Focusing of electromagnetic waves by periodic arrays of air holes with gradually varying radii. *Opt Express* 2006; 14(22): 10759-64.
- [8] Wu Q, Gibbons JM, Park W. Graded negative index lens by photonic crystals. *Opt Express* 2008; 16(21): 16941-9.
- [9] Triandafilov JR, Kotlyar VV. Mikaelian photonic crystal lens. *Computer optics* 2007; 31(3): 27-31.
- [10] Kotlyar VV, Triandafilov JR, Kovalev AA, Kotlyar MI, Volkov AV, Volodkin BO, Soifer VA, Faolain L, Kraus T. Photonic crystal lens for two waveguides coupling. *Computer optics* 2008; 32(4): 326-36