

ОПТИЧЕСКИЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ**Разработка и анализ логических элементов «ИЛИ-НЕ», «И-НЕ» и «исключающее ИЛИ-НЕ» на основе эффекта интерференции*****Сунь Сяо-Вэнь, Ян Сю-Лунь, Мэн Сян-Фэн, Чжу Цзи-Нань,
Ван Юй-Жун, Инь Юн-Кай, Дун Го-Янь**

Проведены разработка и анализ логических элементов «ИЛИ-НЕ», «И-НЕ» и «исключающее ИЛИ-НЕ» на основе двумерных фотонных кристаллов на длине волны 1.55 мкм. Эффекты интерференции и самоколлимации использовались для создания логических элементов, в которых управление выходным сигналом осуществляется за счет настройки разности фаз сигнальных волн для достижения конструктивной или деструктивной интерференции. Делителем служит линейный дефект фотонного кристалла, состоящего из ряда регулярно расположенных воздушных стержней. Радиус стержней дефекта меняется в зависимости от того, какие функции должен выполнять логический элемент. Использование таких логических элементов позволяет уменьшить размеры оптических логических устройств.

Ключевые слова: интерференция, фотонные кристаллы, оптические логические устройства.

1. Введение

В последние годы появилось большое число публикаций, посвященных полностью оптическим логическим элементам [1–4]. Эти элементы могут выполнять множество функций и поэтому привлекают большое внимание. Однако им присущи некоторые недостатки, например низкое быстродействие, сложная структура и большой размер. Недавно были предложены полностью оптические логические элементы на основе двумерных фотонных кристаллов (ФК) [5–8]. ФК можно рассматривать как искусственную микроструктуру из двух и более диэлектриков, в которой диэлектрики периодически упорядочены. Весьма перспективным является использование ФК для создания полностью оптических интегральных схем [9, 10]. По сравнению с традиционными оптическими волноводами, волноводы на основе ФК позволяют эффективно уменьшать размеры устройств и затраты на передачу сигналов. Полностью оптические логические элементы на ФК могут создаваться на основе нелинейно-оптических эффектов третьего порядка [11, 12], эффектов многомодовой интерференции [13] и самоколлимации [14], а также резонансов в резонаторе. Эффект самоколлимации является проявлением аномальной дисперсии в ФК. Самоколлимированный пучок можно передавать по прямой линии в ФК без дифракции, подобно тому, как это происходит в фотонно-кристаллическом волноводе [15]. Это

обеспечивает новый метод управления распространением света. Самоколлимированная передача света не связана с его интенсивностью и при неизменной структуре ФК всегда может поддерживать прямолинейное распространение. Эффект самоколлимации имеет значительный потенциал для применения в различных приложениях [16, 17]. В то же время для разработки логических элементов мы используем интерференцию, известную в классической оптике. Управление выходным сигналом осуществляется посредством настройки разности фаз сигнальных волн для достижения конструктивной или деструктивной интерференции в качестве логической единицы или логического нуля. В настоящей работе мы рассматриваем логические элементы «ИЛИ-НЕ», «исключающее ИЛИ-НЕ» и «И-НЕ» на основе эффектов интерференции и самоколлимации.

2. Основные принципы и структура логических элементов

Рассмотрим схемы логических устройств на основе квадратного двумерного ФК, образованного заполненными воздухом отверстиями в кремнии*. Радиус отверстий $r = 0.3a$, где a – постоянная решетки кремния. Диэлектрическая постоянная базовой среды (кремния) $\epsilon = 11.56$. Эффект самоколлимации возникает из-за возможности получения плоского участка контура равной частоты (КРЧ) [18]. КРЧ оптического излучения – это кривые $f(k_x, k_y) = \text{const}$ в плоскости $k_x k_y$. Здесь f – безразмерная частота (в единицах ca), а k_x, k_y – волновые векторы излучения. Распространение света в двумерном ФК с плоским КРЧ происходит с участием всей первой зоны Бриллюэна. Эффект самоколлимации можно объяснить на основе теоремы Блоха с помощью фурье-преобразования расчитанного поля. Если КРЧ плоский, происходит самоколлимация. На рис.1 представлены КРЧ второй зоны

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

Sun Xiao-Wen, Yang Xiu-Lun, Meng Xiang-Feng, Zhu Ji-Nan, Wang Yu-Rong, Yin Yong-Kai. Shandong University, Department of Optics, School of Information Science and Engineering, and Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, China, Jinan 250100; e-mail: xlyang@sdu.edu.cn
Dong Guo-Yan. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China

Поступила в редакцию 15 июня 2017 г., после доработки – 10 октября 2017 г.

* Эти отверстия в объеме ФК образуют цилиндрические воздушные стержни, и в дальнейшем будет использоваться именно термин «стержень».

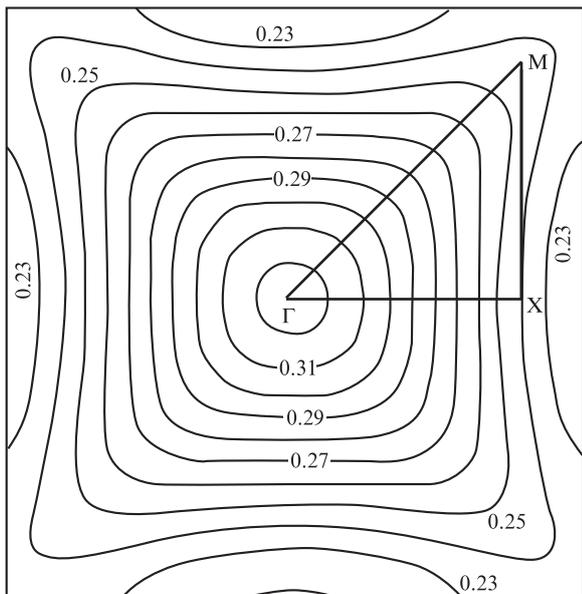


Рис.1. КРЧ второй зоны Бриллюэна для моды ТЕ предлагаемого ФК. Радиус воздушных отверстий $r = 0.3a$, диэлектрическая постоянная базовой среды $\epsilon = 11.56$. Точки Γ , M , X – характерные точки зоны Бриллюэна кристаллической решетки с центром в точке Γ .

Бриллюэна для ТЕ моды. Когда $f = 0.27$, часть КРЧ является плоской в направлении отрезка GX , и волна с ТЕ поляризацией может распространяться как самоколлимированный пучок. В настоящей работе мы выбираем волну с ТЕ поляризацией на частоте $f = 0.27$ для разработки логических элементов.

При создании логических элементов необходимо использовать светоделитель [19]. Он представляет собой линейный дефект, образованный стержнями, равномерно расположенными вдоль отрезка GM в ФК. Радиус стержня r_d находится в диапазоне $0 - 0.5a$. Для измерения коэффициентов пропускания (T) и отражения (R) светоделителя мы использовали гауссов пучок с ТЕ поляризацией на частоте $f = 0.27$. При изменении радиуса стержней дефекта мы могли получать различные значения T и R , интегрируя вектор Умова – Пойнтинга. На рис.2 представлены зависимости T и R от r_d для одного светоделителя.

В нашей работе вычисляется разность фаз сигнальных волн, необходимая для достижения конструктивной или деструктивной интерференции. Возможность управления начальными фазами волн подтверждена в работе [20]. Как показано в [21], когда радиус стержней линейного дефекта превышает радиус стержней базовой структуры, возникает фазовая задержка отраженного пучка на $-\pi/2$ по отношению к прошедшему пучку. В настоящей работе

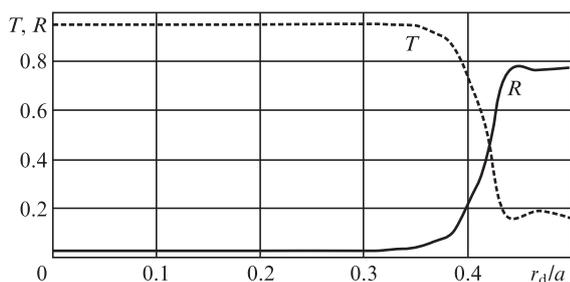


Рис.2. Коэффициенты пропускания T и отражения R по мощности в зависимости от радиуса стержней r_d .

все радиусы стержней, образующих дефект, больше радиусов стержней базовой структуры ФК. Частота падающего света $\nu = fca = 0.27c/a$, постоянная решетки a принимается равной λf . Поскольку мы используем безразмерные единицы, величина a служит единицей длины. Если длина волны λ равна $1.55 \mu\text{m}$, то постоянная решетки $a = \lambda f = 0.4185 \mu\text{m}$, так что $\lambda = 3.7037a$. Предлагаемые логические элементы моделируются и анализируются численно с использованием метода конечных разностей во временной области (finite-difference time-domain, FDTD). Пороги для логического нуля и логической единицы определялись путем численного анализа.

3. Схема логического элемента «ИЛИ-НЕ» и ее анализ

Структура логических элементов «ИЛИ-НЕ» показана на рис.3. Имеются три световые волны на входе и выходе элемента. В порт опорного сигнала свет поступает всегда. Светоделитель $S1$ обеспечивает полное отражение, тогда как светоделители $S2$ и $S3$ отражают свет частично. Три светоделителя ($S1$, $S2$ и $S3$) образованы в ФК линейными дефектами в виде воздушных стержней, равномерно расположенных вдоль отрезка GM . Расстояние Δl_1 между делителями $S1$ и $S2$ равно $25a$. Расстояние Δl_2 между делителями $S2$ и $S3$ составляет $15a$.

В классической оптике интерференция двух волн с амплитудами E_1 и E_2 описывается выражениями

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\sqrt{RT}\cos\Phi, \tag{1}$$

$$\Phi = 2\pi\Delta l/\lambda - \Delta\varphi = 2\pi\Delta l/fa - \Delta\varphi. \tag{2}$$

Если $E_1 = E_2$, то уравнение (1) принимает следующий вид:

$$I = E_1^2(R + T + 2\sqrt{RT})\cos\Phi. \tag{3}$$

Здесь I – интенсивность света после делителя $S2$; E_1 и E_2 – амплитуды волн на входах A и B соответственно (рис.3); $\Delta\varphi$ определяется радиусом стержней светоделителя и равняется $-\pi/2$; Δl – расстояние между светоделителями $S1$ и

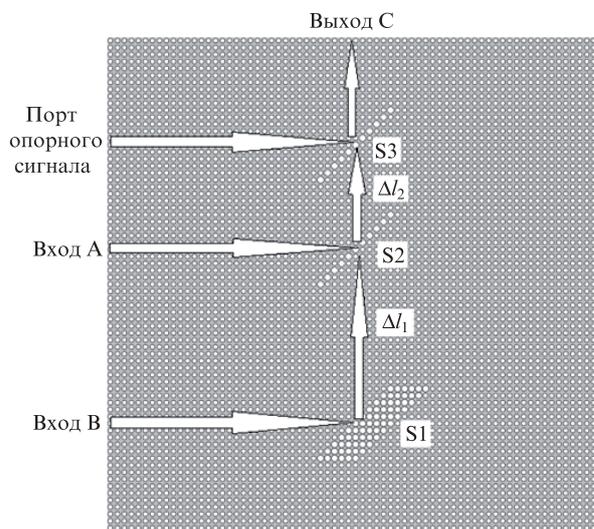


Рис.3. Структура логических элементов «ИЛИ-НЕ» и «И-НЕ». Стрелками показано распространение самоколлимированных пучков.

Табл.1. Логические функции элемента «ИЛИ-НЕ».

Вход А	Вход В	Выход С
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

S2; Φ – разность фаз в каналах А и В на выходе светоделителя S2.

Логические функции элемента «ИЛИ-НЕ» приведены в табл.1. В этом случае радиусы стержней дефектов $r_d^{S1} = 0.410a$, $r_d^{S2} = 0.420a$ и $r_d^{S3} = 0.421a$.

При $r_d = 0.422a$ имеем $T = R = 0.45$ (рис.2). Если $\Delta l_1 = 25a$, то S1 и S2 могут реализовать функции логического элемента «ИЛИ». При $\Delta l_1 = 25a$ получаем

$$\Phi = 0.54 \times 25\pi + 0.5\pi = 14\pi, \quad (4)$$

$$I = E_1^2 [0.45 + 0.45 + 2\sqrt{0.45 \times 0.45} \cos(14\pi)] = 1.8E_1^2. \quad (5)$$

Когда сигналы на входы А и В приходят одновременно, разность их фаз после прохождения через светоделитель S2 равна $7 \times 2\pi$ (см. формулу (4)). Если каждый из сигналов приходит только на один из входов (А или В), то разность фаз сигналов после прохождения через светоделитель S2 в первом и во втором случаях должна быть кратна 2π , чтобы гарантировать такой же результат их интерференции с опорным световым сигналом. Во всех трех указанных случаях разность фаз Φ сигнальной и опорной волн одинакова. Следовательно, одинаковы и результаты интерференции сигнальных волн с опорной волной независимо от различий между входными сигналами.

Затем необходимо реализовать деструктивную интерференцию, при которой свет, проходящий через светоделитель S3, должен деструктивно интерферировать с опорной волной. Разности фаз сигнальных и опорной волн не могут различаться после прохождения через светоделитель S3. В соответствии с размерами устройства мы моделировали процесс интерференции, изменяя Δl_2 шаг за шагом в определенном диапазоне, чтобы определить его оптимальное значение. В результате расчетов было установлено, что наилучший эффект деструктивной интерференции достигается при $\Delta l_2 = 15a$.

Из рис.2 следует, что если $r_d^{S2} = r_d^{S3} = 0.422a$, то $T = R = 0.45$ для делителей S2 и S3. Когда на вход подается только опорная волна, она проходит через делитель S3 и создает световой сигнал на выходе С. Мы можем управлять интенсивностью отраженного света путем изменения радиуса стержней дефекта делителя S3. На выходе получается сигнал, который мы примем за логическую единицу. Когда в устройство вводится опорная волна и сигнал со входа А, интенсивность последнего уменьшается после прохождения через делитель S2. Согласно уравнению (2) сигнал со входа А и опорный сигнал интерферируют деструктивно. Поскольку интенсивности света в канале А и в опорном канале различны, на выходе имеется некоторый остаточный свет. Если необходимо минимизировать выходной оптический сигнал, то нужно увеличить T и уменьшить R делителя S3. Интенсивности света в канале А и в опорном канале после делителя S3 можно сделать примерно равными. Для достижения этой цели нужно соответствующим образом уменьшить r_d^{S3} (см. рис.2). Слабый

сигнал на выходе С по определению принимается за логический ноль. Интенсивность светового сигнала канала В почти не меняется после полностью отражающего делителя S1, но уменьшается после делителя S2. Как уже говорилось выше, после соответствующего уменьшения r_d^{S2} и r_d^{S3} сигнал на выходе С можно использовать как логический ноль. Однако слишком сильное уменьшение r_d^{S2} повлияет на интенсивность сигнала канала А. При одновременном присутствии на входе опорной волны и световых сигналов на входах А и В оптическая разность фаз на выходе делителя S2 составляет $n \cdot 2\pi$ (n – целое число), так что реализуется конструктивная интерференция. Интенсивность света увеличивается, а интенсивность опорной волны после делителя S3 сравнительно мала, т.е. на выходе будет присутствовать некоторый остаточный свет. Согласно рис.2 для минимизации выходного сигнала нужно должным образом увеличить r_d^{S3} . При этом возникает противоречие с упомянутой выше необходимостью уменьшения r_d^{S3} . Большое количество экспериментальных данных подтверждает тот факт, что соответствующее уменьшение r_d^{S3} может сделать результат более близким к идеальному. Сигнал на выходе С можно использовать как логический ноль, а радиусы стержней дефектов $r_d^{S2} = 0.420a$ и $r_d^{S3} = 0.421a$. Мы определяем отношение (в %) интенсивности на выходе к интенсивности опорной волны и в соответствии с этим отношением устанавливаем логический ноль и единицу. Согласно результатам моделирования определяется порог: интенсивность более 30% – логическая единица, менее 30% – логический ноль. На рис.4 показаны распределения поля, полученные при моделировании.

4. Схема логического элемента «И-НЕ» и ее анализ

Структура логического элемента «И-НЕ» показана на рис.3. Она аналогична структуре логического элемента «ИЛИ-НЕ». Имеются три световых сигнала на входе и выходе. В порт опорного сигнала свет подается всегда. Делитель S1 – полностью отражающий, а делители S2 и S3 – частично отражающие. Все делители (S1, S2 и S3) выполнены в ФК в виде линейных дефектов – отверстий (стержней), расположенных равномерно вдоль отрезка ГМ (рис.1). При этом $\Delta l_1 = 25a$, а $\Delta l_2 = 15a$. Логические функции элемента «И-НЕ» приведены в табл.2, а радиусы образующих делители стержней $r_d^{S1} = 0.421a$, $r_d^{S2} = 0.417a$ и $r_d^{S3} = 0.425a$.

Когда на входе присутствует только опорная волна, она проходит через делитель S3 и создает световой сигнал на выходе С. Интенсивностью отраженного света можно управлять путем выбора соответствующего радиуса стержней делителя S3. Получающийся на выходе сигнал принимается за логическую единицу. Когда свет подается только на один из входов (А или В), оптическая разность фаз сигналов после прохождения через светоделитель S2 должна составлять целое число 2π , чтобы гарантировать одинаковый результат интерференции этих сигналов с полем опорной волны, поэтому Δl_1 выбрано равным $25a$. При одновременном вводе опорной волны и сигналов со входов А и В вносимая последними разность фаз после прохождения через светоделитель S2 равна целому числу 2π , так что реализуется конструктивная интерференция. Для того чтобы на выходе С световой сигнал отсутствовал, необходимо добиться деструктивной

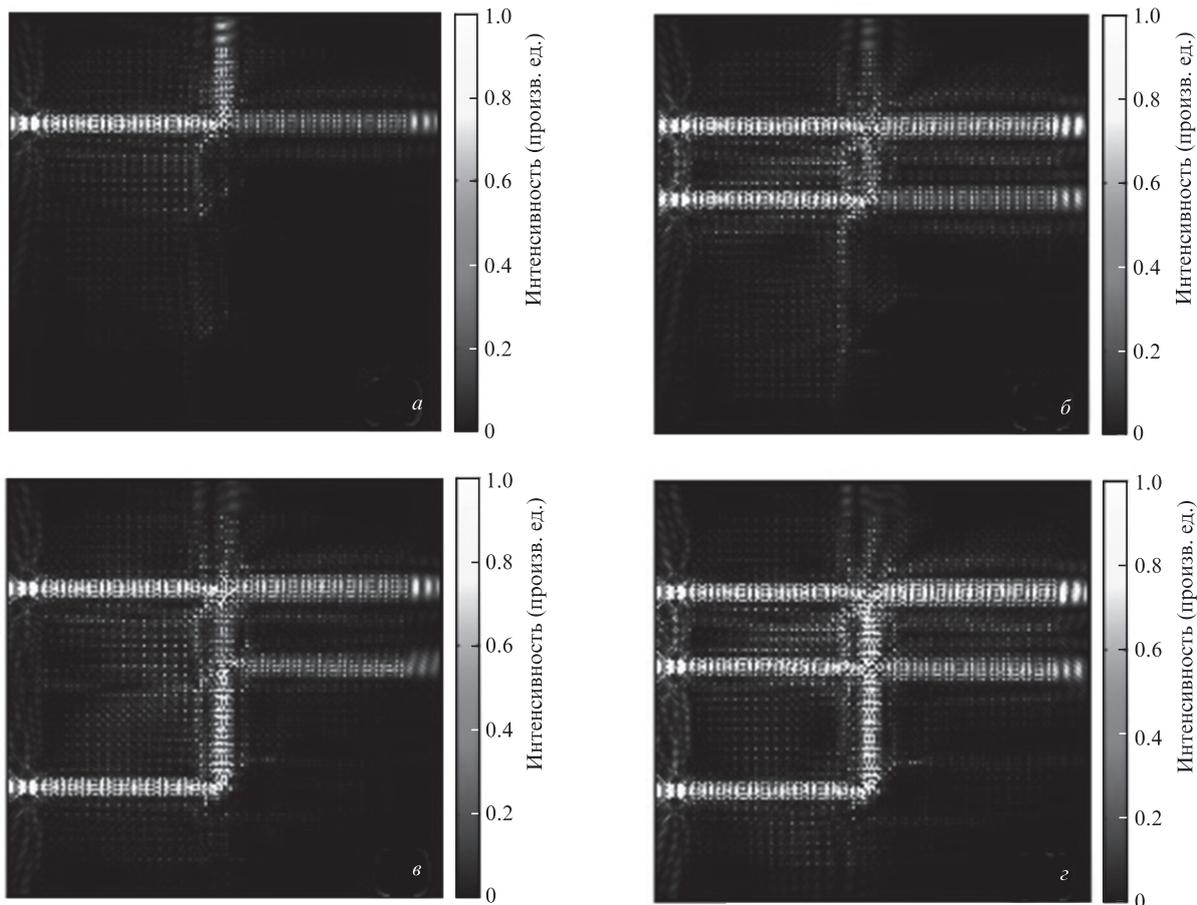


Рис.4. Рассчитанные распределения поля в логическом элементе «ИЛИ-НЕ». Присутствуют только опорный сигнал (результат – логическая единица) (а), опорный сигнал и сигнал на входе А (результат – логический ноль) (б), опорный сигнал и сигнал на входе В (результат – логический ноль) (в), опорный сигнал и сигналы на входах А и В (результат – логический ноль) (г). Размер структуры 25 × 25 мкм.

Табл.2. Логические функции элемента «И-НЕ».

Вход А	Вход В	Выход С
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

интерференции после прохождения сигнальными волнами через светоделитель S3. В соответствии с размерами устройства мы шаг за шагом изменяли Δl_2 в определенных пределах, чтобы получить его оптимальное значение. В результате расчетов было установлено, что наилучший эффект деструктивной интерференции достигается при $\Delta l_2 = 15a$. При этом после прохождения через делитель S3 интенсивность сигнальной волны увеличивается, а интенсивность опорной волны становится сравнительно малой. Для ослабления остаточного света и минимизации выходного сигнала нужно, согласно рис.2, соответствующим образом увеличивать r_d^{S3} . Сигнал на выходе С можно использовать в качестве логического нуля. При вводе опорного сигнала вместе с одним из сигналов на входе А или В интенсивность опорной волны после делителя S3 относительно высока. Хотя опорная волна испытывает деструктивную интерференцию со световой волной, приходящей от входа А или В, сигнал на выходе С все же можно использовать как логическую единицу. Согласно результатам численного моделирования радиусы стержней должны быть таковы: $r_d^{S2} = 0.417a$ и $r_d^{S3} = 0.425a$.

Порог определяется на уровне 30% (больше – логическая единица, меньше – логический ноль). На рис.5 показаны рассчитанные распределения поля.

5. Схема логического элемента «исключающее ИЛИ-НЕ» и ее анализ

Структура логического элемента «исключающее ИЛИ-НЕ» показана на рис.6. Имеются три световые волны в качестве входных и выходных сигналов. В порт опорного сигнала всегда подается свет. Светоделитель S1 – полностью отражающий, а делители S2 и S3 – частично отражающие. Три делителя (S1, S2 и S3) выполнены в ФК в виде линейных дефектов, выстроенных вдоль отрезка ГМ. Расстояния между делителями $\Delta l_1 = 12a$ и $\Delta l_2 = 25a$. Логические функции элемента «исключающее ИЛИ-НЕ» приведены в табл.3, а соответствующие радиусы стержней $r_d^{S1} = 0.387a$, $r_d^{S2} = 0.417a$ и $r_d^{S3} = 0.419a$.

При наличии только опорной световой волны она проходит через три делителя и всегда создает сигнал на выходе С, интенсивность которого можно регулировать путем подбора подходящих радиусов стержней, образующих светоделители. При этом радиусы r_d^{S2} и r_d^{S3} должным образом уменьшаются, чтобы обеспечить выходной сигнал, который принимается за логическую единицу. В присутствии синхронных опорного сигнала и сигнала на входе А, а также при условии $\Delta l_1 = 12a$

$$\Phi = 0.54 \times 12\pi + 0.5\pi = 6.98\pi \tag{6}$$

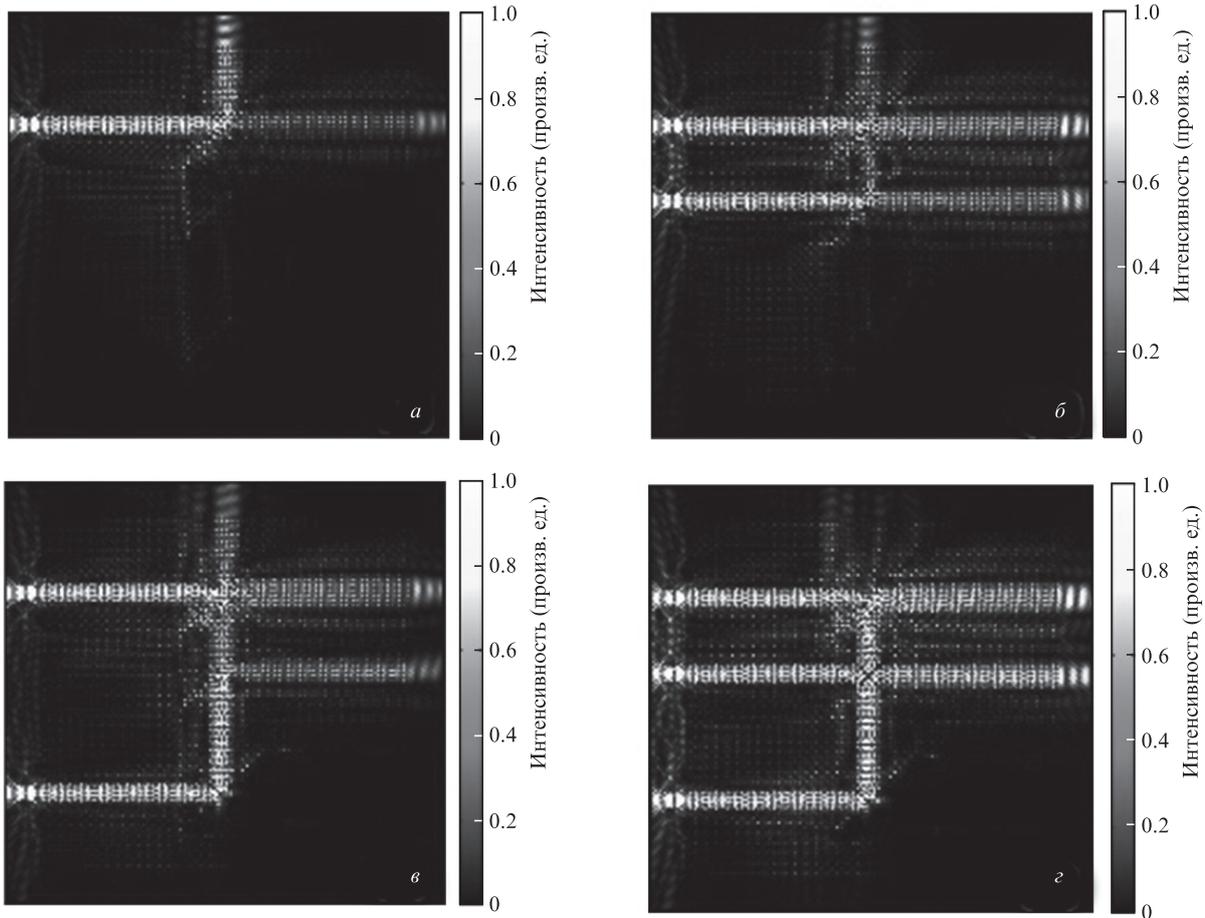


Рис.5. Рассчитанные распределения поля в логическом элементе «И-НЕ». Присутствуют только опорный сигнал (результат – логическая единица) (а), опорный сигнал и сигнал на входе А (результат – логическая единица) (б), опорный сигнал и сигнал на входе В (результат – логическая единица) (в), опорный сигнал и сигналы на входах А и В (результат – логический ноль) (г). Размер структуры 25 × 25 мкм.

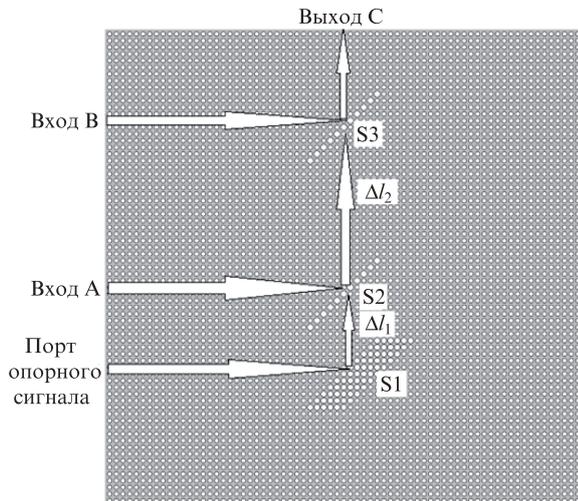


Рис.6. Структура логического элемента «исключающее ИЛИ-НЕ». Стрелками показано распространение самоколлимированных пучков.

и имеет место деструктивная интерференция, результат которой принимается за логический ноль. При подаче света в порт опорного сигнала и на вход В мы проводим моделирование, шаг за шагом изменяя величину Δl_2 в некоторых пределах, стремясь добиться деструктивной интерференции. Результаты расчетов показывают, что оптимальными для достижения деструктивной интерферен-

Табл.3. Логические функции элемента «исключающее ИЛИ-НЕ».

Вход А	Вход В	Выход С
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ции является $\Delta l_2 = 25a$. Результат такой интерференции трактуется как логический ноль. Когда одновременно присутствуют опорный сигнал и сигналы на входах А и В, волна на входе А деструктивно интерферирует с опорной волной после прохождения через делитель S2, так что интенсивность волны, дошедшей до делителя S3, очень мала. В свою очередь, волна на входе В отражается делителем S3, и этот сигнал на выходе С можно использовать как логическую единицу. Согласно результатам численного моделирования соответствующие радиусы стержней $r_d^{S2} = 0.417a$ и $r_d^{S3} = 0.419a$. Порог определяется равным 30%, выше этого значения – логическая единица, ниже – логический ноль. Рассчитанные распределения поля демонстрирует рис.7.

6. Заключение

В настоящей работе предложены и проанализированы три логических элемента на основе двумерного ФК на длине волны 1.55 мкм. С использованием эффектов ин-

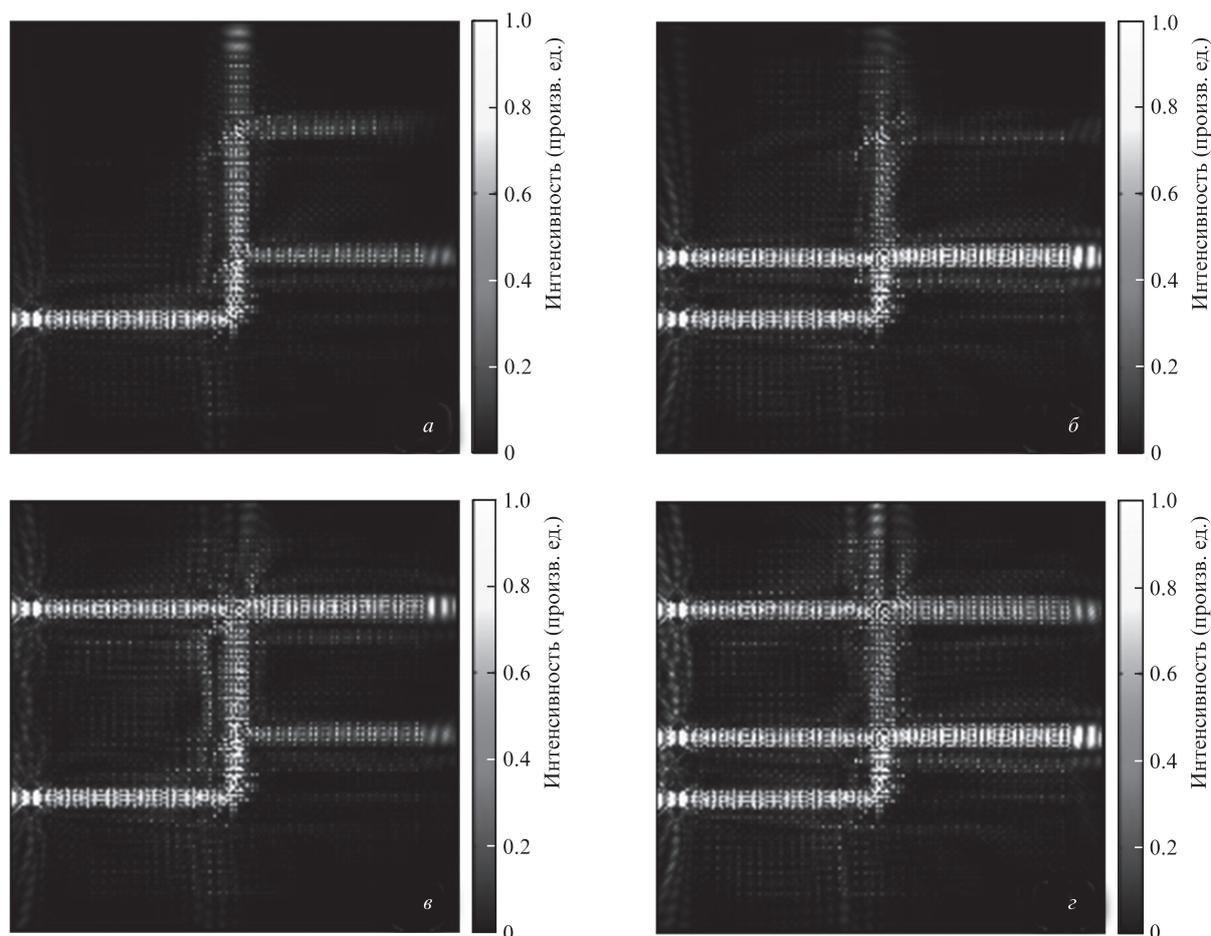


Рис.7. Рассчитанные распределения поля в логической ячейке «исключающее ИЛИ-НЕ». Присутствуют только опорный сигнал (результат – логическая единица) (а), опорный сигнал и сигнал на входе А (результат – логический нуль) (б), опорный сигнал и сигнал на входе В (результат – логический нуль) (в), опорный сигнал и сигналы на входах А и В (результат – логическая единица) (г). Размер структуры 25×25 мкм.

терференции и самоколлимации реализуются функции логических элементов «ИЛИ-НЕ», «И-НЕ» и «исключающее ИЛИ-НЕ», что достигается настройкой разности фаз сигнальных волн, обеспечивающей их конструктивную или деструктивную интерференцию. Элементы имеют простую структуру и подходят для применения в фотонных интегральных схемах. Размер структуры составляет 25×25 мкм.

Настоящая работа была поддержана Фондом естественных наук провинции Шаньдун (грант № ZR2016FM03), Объединенным фондом предварительных исследований оборудования и Министерством образования, Фондами фундаментальных исследований Шаньдунского университета (грант № 2015GN031) и Национальным фондом естественных наук Китая (гранты № 11574311 и 61775121).

1. Sharifi H., Hamidi S.M., Navi K. *Opt. Commun.*, **370**, 231 (2016).
2. Zhang Y., Zhang Y., Li B. *Opt. Express*, **15** (15), 9287 (2007).
3. Igarashi K., Kikuchi K. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **14** (3), 551 (2008).
4. Fu Y., Hu X., Lu C., et al. *Nano Lett.*, **12** (11), 5784 (2012).
5. Rani P., Kalra Y., Sinha R.K. *Opt. Commun.*, **374**, 148 (2016).

6. Moniem T.A. *Opt. Quantum Electron.*, **47** (8), 1 (2015).
7. D'Souza N.M., Mathew V. *Opt. Laser Technol.*, **80**, 214 (2016).
8. Goudarzi K., Mir A., Chaharmahali I., et al. *Opt. Laser Technol.*, **78** (4), 139 (2016).
9. Xavier S.C., Carolin B.E., Kabilan A.P., et al. *Iet Optoelectron.*, **10** (4), 142 (2016).
10. Salmanpour A., Mohammadnejad S., Bahrami A. *Opt. Quantum Electron.*, **47** (7), 2249 (2015).
11. Liu Y., Qin F., Meng Z.M., et al. *Opt. Express*, **19** (3), 1945 (2011).
12. Pezeshki H., Darvish G. *Opt. Quantum Electron.*, **48** (8), 1 (2016).
13. Tang C., Dou X., Lin Y., et al. *Opt. Commun.*, **316** (7), 49 (2014).
14. Jiang Y.C., Liu S.B., et al. *Opt. Commun.*, **348** (6), 90 (2015).
15. Kosaka H., Kawashima T., Tomita A., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (9), 1212 (1999).
16. Lee S.G., Park J.M., Kee C.S., et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49** (5), 055101 (2016).
17. Tsai C.N., Chen L.W. *Appl. Phys. A*, **122** (7), 659 (2016).
18. Prather D.W., Shi S., Pustai D.M., et al. *Opt. Lett.*, **29** (1), 50 (2004).
19. Chen H., Li Z., Liu W., et al. *Opt. Commun.*, **262** (1), 120 (2006).
20. Weiner A.M., Leaird D.E., Patel J.S., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (4), 908 (1992).
21. Zhao D., Zhang J., Yao P., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **90** (23), 1246 (2007).