

ОПТИЧЕСКИЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Полностью оптический логический элемент «исключающее ИЛИ–НЕ» на основе двумерных фотонно-кристаллических кольцевых резонаторов*

Тамер А.Монием

Предложен новый полностью оптический логический элемент «исключающее ИЛИ–НЕ» (XNOR), сочетающий использование нелинейного эффекта Керра и фотонно-кристаллических кольцевых резонаторов (ФККР). Полный размер предлагаемого логического элемента XNOR, представляющего собой квадратную фотонно-кристаллическую решетку из кремниевых стержней, составляет 35×21 мкм. Предлагаемая структура имеет запрещенную зону от 0.32 до 0.44. Для подтверждения принципа действия элемента и его реализуемости использовано аналитическое и численное моделирование системы в конечно-разностной временной области (FDTD) с применением разложения по плоским волнам (PWE).

Ключевые слова: фотонные кристаллы, фотонно-кристаллические кольцевые резонаторы, оптические логические элементы, оптические коммутаторы.

1. Введение

В последние годы в научной литературе были представлены полностью оптические логические элементы [1–6] и несколько составных оптических логических устройств, таких как оптический демультиплексор [7, 8], оптический кодер [9, 10], оптические декодеры [11–13] и оптические реле [14–16] на основе фотонных кристаллов (ФК). Такие оптические устройства играют ключевую роль в осуществлении полностью оптических систем связи и оптических сетей для обработки сигналов. Разработке оптических логических элементов на основе ФК посвящено много работ, т. к. именно фотонные кристаллы представляются наиболее перспективными ввиду их высокого КПД передачи, высокой добротности и стабильности.

В настоящей работе предлагается новая структура для реализации полностью оптического логического элемента «исключающее ИЛИ–НЕ» (XNOR) на основе двух фотонно-кристаллических кольцевых резонаторов (ФККР). Структурной основой логического элемента XNOR является квадратная решетка из кремниевых стержней, окруженных воздухом. Такой оптический логический элемент интересен и важен для интегральной оптики. Его можно использовать для реализации ряда оптических комбинационных логических устройств на двумерных фотонных кристаллах, таких как полусумматор, полный сумматор, логический компаратор и схема контроля четности в оптической системе связи.

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

Tamer A.Moniem. Misr University for Science & Technology, Al-Motamayez District, P.O.Box: 77, 6th of October City, Cairo, Egypt; e-mail: Tamerkhawaga@yahoo.com, tamer.abdelmoniem@must.edu.eg

Поступила в редакцию 19 декабря 2016 г., после доработки – 22 января 2017 г.

2. Фотонно-кристаллический кольцевой резонатор

Оптический ФККР создается в основной структуре путем удаления части стержней, как это показано на рис. 1 [11, 17], где удален набор из 9×9 диэлектрических стержней для обеспечения резонанса на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Такой ФККР представляет собой квадратную решетку 18×15 мкм из кремниевых стержней с показателем преломления 3.39 в воздухе. Радиус стержней $r = 0.21a$, где $a = 630$ нм – постоянная решетки для данной структуры.

Структура ФККР образована тремя волноводами (L1, L2, L3), четырьмя портами (A, B, C, D) и управляющим портом (S). Оптическая структура возбуждается через входной порт A оптическим сигналом смещения на длине волны $\lambda = 1550$ нм. В зависимости от управляющего сиг-

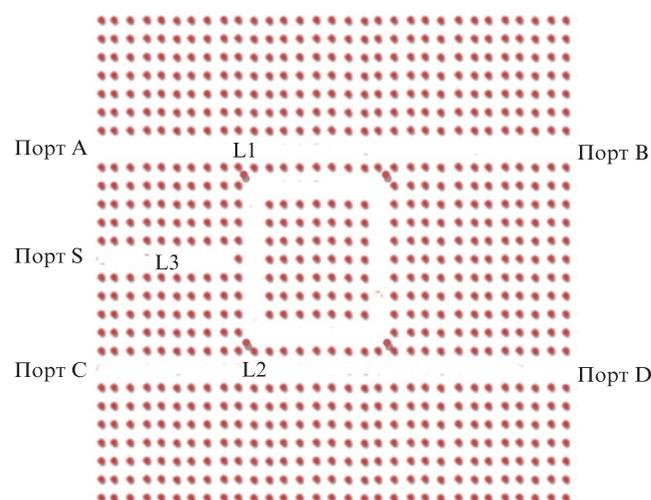


Рис. 1. Схематическая структура фотонно-кристаллического кольцевого резонатора.

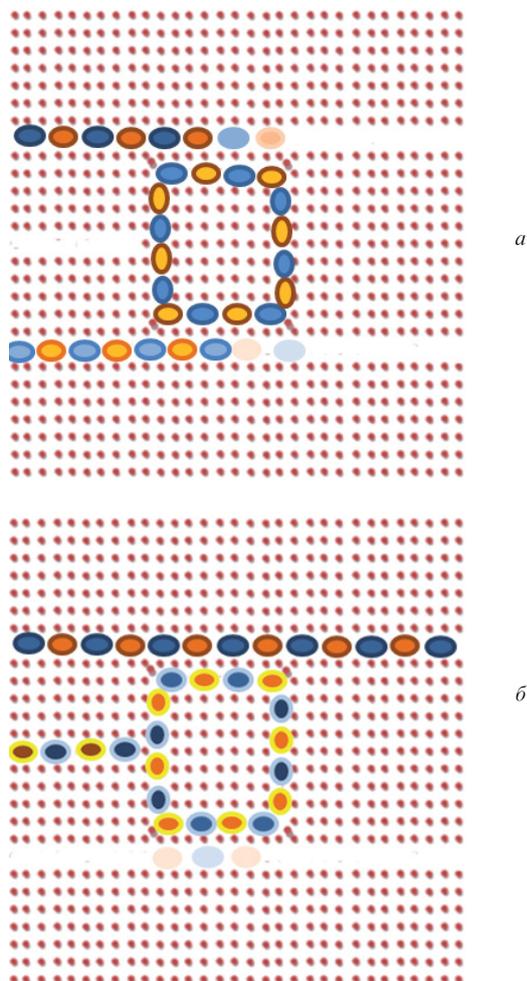


Рис.2. Распределение поля в ФККР при $S = 0$ (а) и $S = 1$ (б). Цветное изображение см. на сайте КЭ (<http://www.quantum-electron.ru>).

нала, поступающего в порт S, сигнал смещения направляется в один из выходных портов (B, C, D).

Когда сигнал управляющего порта S равен 0 (0 мВт), входной оптический сигнал смещения из порта A на резонансной длине волны $\lambda = 1550$ нм через волновод L1 попадает в кольцо и затем в порт C за счет связи с волноводом L2 (рис.2,а). При подаче оптического управляющего сигнала $S = 1$ (100 мВт) интенсивность поля в кольце увеличивается, препятствуя прохождению входного сигнала смещения из порта A в кольцо и направляя его в выходной порт B (рис.2,б). Переключение происходит за счет того, что повышение интенсивности света в кольце приводит к изменению эффективного показателя преломления в нем из-за нелинейного эффекта Керра, что вызывает сдвиг его резонансной длины волны. Поэтому при высокой интенсивности света в кольце излучение на длине волны 1550 нм в него не попадает.

3. Теоретический метод и проектирование полностью оптического логического элемента XNOR

«Исключающее ИЛИ–НЕ» (XNOR) – логический элемент, дополнительный к «исключающему ИЛИ»

Табл.1. Показатель истинности логического элемента XNOR.

Входы		Выход
A	B	$Y = A \text{ XNOR } B$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

(XOR) [18]. Большое значение выходного сигнала, соответствующее единице, получается при совпадении входных сигналов, в противном случае на выходе получается сигнал, малое значение которого соответствует нулю, как показано в табл.1.

Представленный в работе полностью оптический логический элемент XNOR на основе квадратной двумерной решетки ФК размером 35×21 мкм, схематически показан на рис.3. Расстояние между двумя соседними стержнями $a = 630$ нм, радиус стержня $r = 0.21a$. Логический элемент XNOR образован двумя фотонно-кристаллическими кольцевыми резонаторами (ФККР1 и ФККР2) радиусом $5a$ и двумя волноводами (L1 и L2). Входы A, B сигналов смещения связаны с кольцевыми резонаторами ФККР1 и ФККР2 соответственно. Оптический логический элемент XNOR приводится в действие оптическим входным сигналом смещения, подаваемым на левый конец волновода L1, а выходной сигнал Y XNOR снимается с правого конца волновода L1. В углах всех ФККР и волновода L2 имеются дополнительные стержни, смещенные в сторону угла на $0.707a$ с таким же показателем преломления и радиусом, как и остальные стержни структуры, для исключения обратного рассеяния от углов [10, 13, 15]. Для предотвращения вертикального распространения излучения полупроводниковые стержни, окруженные воздухом, поддерживаются материалом с низким показателем преломления (SiN_x , SiO_x , полимеры) [19–21].

Для расчета фотонной запрещенной зоны используется разложение по плоским волнам (PWE) [22] и метод FDTD [23]. Для поперечной электрической TE моды нормированная фотонная запрещенная зона находится в области $0.32 \leq a/\lambda \leq 0.44$, что при постоянной решетки $a = 630$ нм соответствует $1432 \text{ нм} < \lambda < 1969 \text{ нм}$ (рис.4). Ключевой для фотонного кристалла является структура с периодическим изменением диэлектрической постоянной. В области фотонной запрещенной зоны свет не может распространяться в структуре кристалла и распространяется только в волноводе [21].

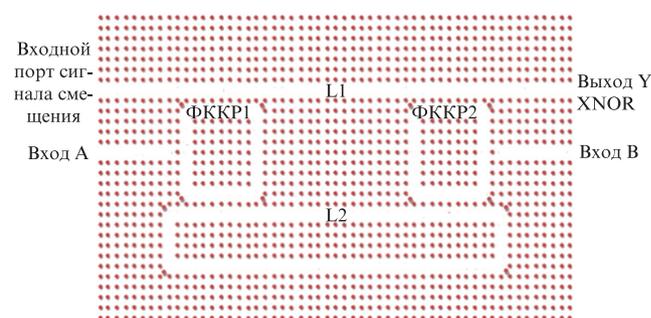


Рис.3. Полная структура оптического логического элемента XNOR на основе двумерной квадратной фотонно-кристаллической решетки.

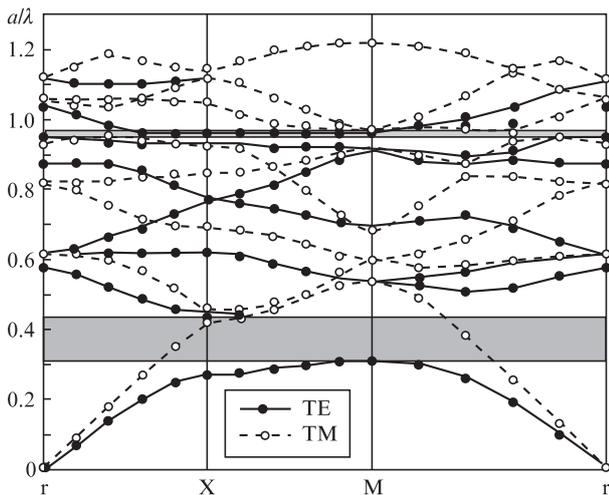


Рис.4. Структура фотонных запрещенных зон для квадратной фотонно-кристаллической решетки из кремниевых стержней радиусом $0.21a$.

4. Результаты моделирования оптического логического элемента XNOR

Данный раздел посвящен описанию работы оптического XNOR и результатов, полученных для предлагаемой структуры. Принцип работы оптического XNOR основан на использовании ФККР, в которых оптическая интенсивность циркулирующего излучения увеличивается за счет ввода мощности управляющих сигналов, поступающих в ФККР через переключающие входы А и В. Мощность оптического сигнала смещения, подаваемого в волновод L1, всегда соответствует логической единице (100 мВт) на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Кроме этого, на длине волны $\lambda = 1560$ нм на структуру оптического логи-

ческого элемента XNOR подается последовательность логических входных сигналов через порты А, В. Рассмотрим следующие варианты.

Случай 1. При $A = B = 0$ (0 мВт) входное оптическое поле смещения попадает в кольцевой резонатор ФККР1 благодаря его связи с волноводом L1. Через связанный с ФККР1 волновод L2 поле направляется в ФККР2. За счет связи ФККР2 с волноводом L1 поле снова оказывается в нем и направляется в выходной порт Y со средней оптической мощностью логического выхода, равной 87 мВт (рис.5,а).

Случай 2. При $A = 0$ (0 мВт) и $B = 1$ (100 мВт) входное оптическое поле смещения попадает в кольцевой резонатор ФККР1, благодаря его связи с волноводом L1. Оптический сигнал через вход В (100 мВт) попадает в резонатор ФККР2 и увеличивает в нем интенсивность поля. Это блокирует связь между волноводами L2 и L1 через ФККР2. Выходной сигнал Y логического элемента XNOR соответствует логическому нулю (0) (рис.5,б).

Случай 3. При $A = 1$ (100 мВт) и $B = 0$ (0 мВт) оптический сигнал входного порта А (100 мВт) попадает в ФККР1 и увеличивает в этом кольцевом резонаторе интенсивность поля, что блокирует связь волнопроводов L1 и L2 через ФККР1. Оптический сигнал с порта смещения направляется в ФККР2 и далее в волновод L2, что дает на выходе $Y = 0$ (14 мВт) (рис.5,в).

Случай 4. При $A = B = 1$ (100 мВт) входной сигнал смещения направляется по волноводу L1 непосредственно на выходной порт $Y = 1$ (100 мВт), поскольку сигналы обоих входных логических портов, попадая в резонаторы ФККР1 и ФККР2, блокируют связь волнопроводов L1 и L2 через оба кольцевых резонатора (рис.5,г).

Для реализации оптического элемента XOR, являющегося логическим дополнением XNOR, на выходе предлагаемой структуры необходимо добавить логический элемент NOT [4, 10, 13].

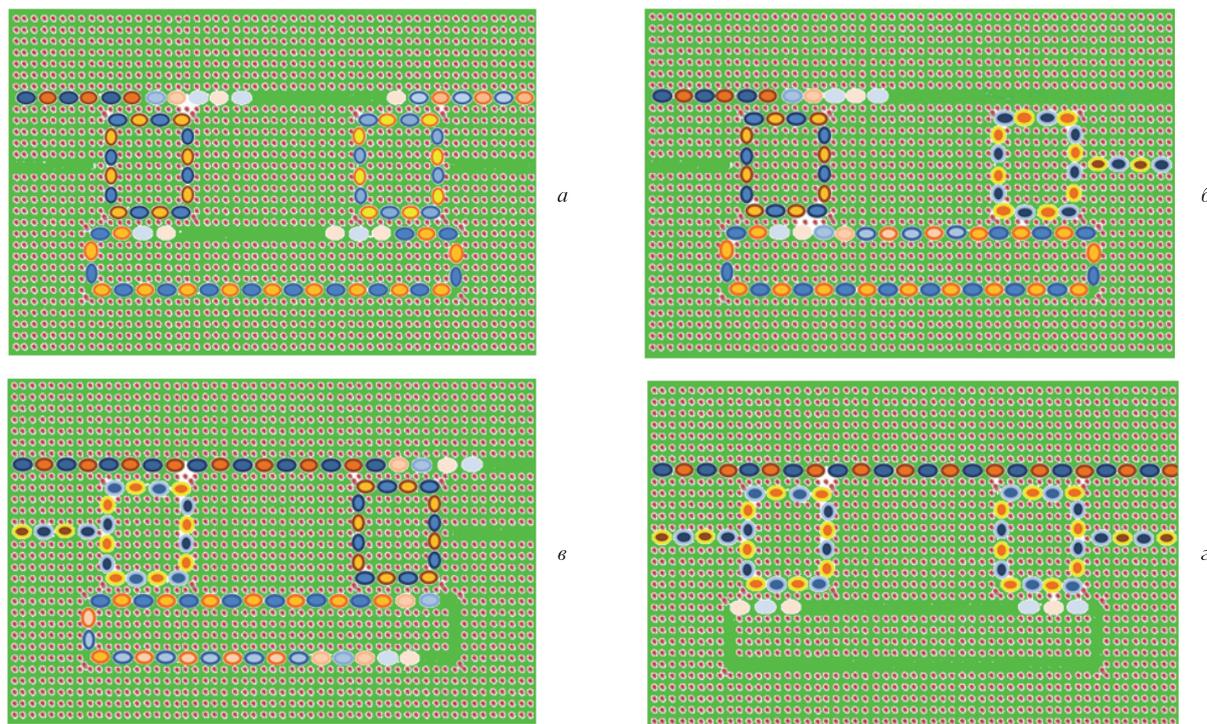


Рис.5. Картина электрического поля в оптическом логическом элементе XNOR в случае различных сигналов на логических входах: $A = B = 0$ (а), $A = 0, B = 1$ (б), $A = 1, B = 0$ (в), $A = B = 1$ (г). Цветное изображение см. на сайте КЭ (<http://www.quantum-electron.ru>).

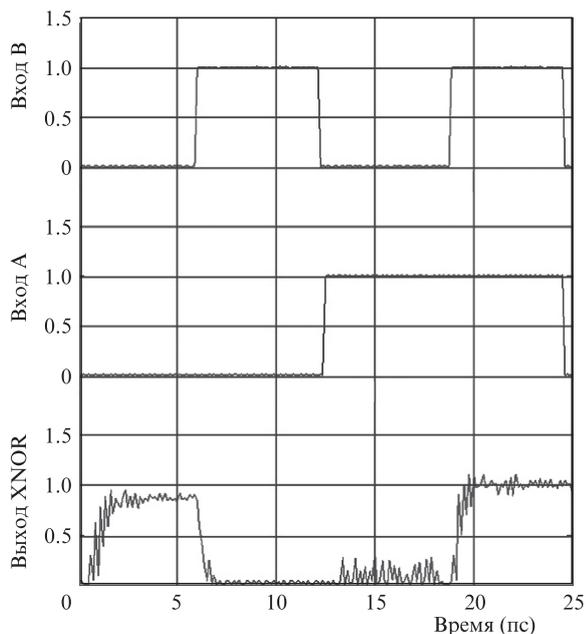


Рис.6. Результаты численного моделирования выходного сигнала предлагаемого оптического логического элемента XNOR.

На рис.6 показана временная динамика выходного сигнала логического элемента XNOR при различных входных сигналах. Нормированные выходные сигналы численно промоделированы с использованием метода FDTD и разложения по плоским волнам PWE. Все результаты моделирования выражены в произвольных единицах при входной мощности 100 мВт. Время установления выходного сигнала XNOR $t_r = 1.92$ пс при $A = B = 0$ и 1.12 пс при $A = B = 1$ (рис.6), а время стационарности достигнутого состояния $t_{ss} = 2.96$ и 1.73 пс соответственно.

Таким образом, предлагаемая структура логического элемента XNOR может быть использована в существующих сетях связи для достижения высокой частоты переключений и скорости передачи данных.

5. Заключение

Оптический логический элемент XNOR является важным логическим элементом и может оказаться полезным при проектировании оптического полусумматора, сумматора, логического компаратора, элемента сетевого контроля четности и других комбинированных логических схем на основе фотонно-кристаллических структур, весьма перспективных для интегральной оптики. Рассмотрен новый простой оптический логический элемент

XNOR на основе двух фотонно-кристаллических кольцевых резонаторов с резонансной длиной волны 1550 нм. Предложенная структура оптического XNOR может быть преобразована в оптический логический элемент XOR путем добавления оптического логического элемента NOT. Работоспособность и эффективность устройства подтверждены результатами аналитического и численного моделирования с применением методов FDTD и PWE.

1. Ye Liu, Fei Qin, Zi-Ming Meng, Fei Zhou, Qing-He Mao, Zhi-Yuan Li. *Opt. Express*, **19** (3), 1945 (2011).
2. Wen-Piao Lin, Yu-Fang Hsu, Han-Lung Kuo. *Amer. J. Modern Phys.*, **2** (3), 144 (2013).
3. Yi-Pin Yang, I-Chen Yang, Chia Hsien Chang, Yao-Tsung Tsai, Kun-Yi Lee, Yi-Rung Tsai, Yong-Si Tu, Sin-Fu Liao, Ching-Chou Huang, Yen-Juei Lin, Wei-Yu Lee, Cheng-Che Lee. *Intern. Symp. on Computer, Consumer and Control* (Taichung, Taiwan, 2012).
4. Ghadrnan M., Mansouri-Birjandi M.A. *IJECE*, **3** (4), 478 (2013).
5. Tanabe T., Notomi M., Mitsugi S., Shinya A., Kuramochi E. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (15), 151112 (2005).
6. Salmanpour A., Mohammadnejad S., Bahrami A. *J. Modern Optic*, **62** (9), 693 (2015).
7. Alipour-Banaei H., Mehdizadeh F., Serajmohammadi S. *Optik*, **124**, 5964 (2013).
8. Rostami A., Alipour Banei H., Nazari F., Bahrami A., *Optik*, **122**, 1481 (2011).
9. Ribeiro R.M., Lucarz F., Fracasso B. *Proc. 18th Europ. Conf. Network Opt. Commun. & Opt. Cabling Infrastructure (NOC-OSI, 2013)* (Graz, Austria, 2013, p. 35).
10. Moniem T.A. *J. Modern Optic*, **63** (8), 735 (2016).
11. Serajmohammadi S., Alipour-Banaei H., Mehdizadeh F. *Opt. Quantum Electron.*, **47** (5), 1109 (2015).
12. Alipour-Banaei H., Mehdizadeh F., Serajmohammadi S., Assangholizadeh-Kashtiban M. *J. Modern Optic*, **62** (6), 430 (2015).
13. Moniem T.A. *J. Modern Optic*, **62** (19), 1643 (2015).
14. Abbasi A., Noshad M., Ranjbar R., Reza K. *Opt. Commun.*, **285**, 5073 (2012).
15. Moniem T.A. *Opt. Quantum Electron.*, **47** (8), 2843 (2015).
16. Chin-Hui Chen, Shinji Matsuo, Kengo Nozaki, Akihiko Shinya, Tomonari Sato, Yoshihiro Kawaguchi, Hisashi Sumikura, Masaya Notomi. *Opt. Express*, **19** (4), 3387 (2011).
17. Serajmohammadi S., Absalan H. *Inform. Proces. Agriculture*, **3** (2), 119 (2016).
18. Mano M.M. *Computer Engineering: Hardware Design* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Intern., 1988).
19. Dang Z., Breese M., Recio-Sánchez G., Azimi S., Song J., Liang H., Banas A., Torres-Costa V., Martín-Palma R.J. *Nanoscale Res. Lett.*, **7**, 416 (2012).
20. Loncar M., Doll T., Vuckovic J., Scherer A. *J. Lightwave Technol.*, **18**, 1402 (2000).
21. Moniem T.A. *Opt. Quantum Electronics*, **48**, 424 (2016).
22. Johnson S.G., Joannopoulos J.D. *Opt. Express*, **8**, 173 (2001).
23. Gedney S.D. *Introduction to Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method for Electromagnetics* (Lexington, KY: Morgan and Claypool, 2010).