

Концепция миниатюрного фотонного пространственного переключателя на основе внеосевой зонной пластины

Ю.Э.Гейнц, О.В.Минин, И.В.Минин

Предложена новая концепция полностью оптического, селективного по длине волны двухканального коммутатора на основе эффекта фотонного крючка без применения микромеханических устройств или нелинейных материалов. Рассмотрен прототип такого устройства на базе внеосевой зонной пластины Френеля и обсуждаются его основные параметры. Благодаря уникальному свойству фотонного крючка изменять свою кривизну в зависимости от длины волны облучения λ , данный переключатель является перспективным кандидатом для реализации оптической коммутации в современной оптоэлектронике и миниатюрных устройствах «на чипе». С помощью численного моделирования показано, что оптическая изоляция коммутируемых каналов для переключателя с линейными размерами около $(6\lambda)^3$ на базе внеосевой зонной пластины может достигать 18–20 дБ при работе в диапазоне длин волн 1.5–1.9 мкм.

Ключевые слова: оптический коммутатор, фотонный крючок, внеосевая зонная пластина Френеля.

Оптическая коммутация и оптические переключатели являются ключевым элементом в современных сетевых коммуникациях [1]. Требования к микроминиатюризации устройств диктуют необходимость разработки их компонентов и систем «на чипе» оптического типа, в отличие от коммутирующих схем на основе электронных устройств, управляемых внешним электрическим сигналом [2].

Сегодня известны различные способы построения оптических переключателей. Среди них селективные по длине волны переключатели [3–6] привлекли большое внимание из-за их способности независимо маршрутизировать каналы с разными длинами волн. Обычно оптические переключатели такого типа по сути представляют собой комбинацию спектрометра на дифракционной решетке с пространственным модулятором света [1]. Сравнение различных типов оптических переключателей проведено в работе [7]. Ниже мы предлагаем новую концепцию селективного по длине волны, полностью оптического переключателя на основе недавно открытых структурированных пространственно-локализованных световых пучков, названных «фотонным крючком» [8, 9]. Эта концепция позволяет реализовать немеханический и полностью оптический переключатель «на кристалле», который изменяет направление выходного излучения без использования нелинейных материалов [10].

Физический принцип, на базе которого мы предлагаем осуществить бесконтактную спектрально-селективную коммутацию оптических каналов, основан на эффекте генерации криволинейного фотонного потока при распространении оптической волны через специфический дифракционный оптический элемент с размерами порядка длины волны. В принципе, криволинейный фотонный поток (фотонный крючок) может быть создан несколькими

способами. Один из них состоит в использовании оптически однородной частицы, имеющей асимметрию геометрической формы, или асимметрии освещающего пучка. Например, это может быть прямоугольная призма, цилиндр [11, 12] или эллипсоид при боковом освещении [13], асимметричная планарная линза в форме мезоволновой внеосевой фазовой пластинки [14] и т. д. При другом способе получения искривленного фотонного потока используются геометрически симметричные частицы, со специально созданной асимметрией показателя преломления [11]. Это так называемые янус-частицы, получаемые путем соединения двух и более материалов с различными оптическими характеристиками [15].

Важным свойством фотонного крючка для реализации функции оптического переключателя, является зависимость угла искривления его плеч от длины волны облучения. Поэтому при определенной пространственной конфигурации фотонной микроструктуры и зон приема можно добиться изменения величины оптического сигнала в каждом из каналов при изменении длины волны излучения.

Рассматриваемый тип асимметричной фотонной структуры в виде внеосевой бинарной фазовой пластинки (ФП) Френеля, использовавшейся при численном моделировании, представлен на рис. 1. ФП состояла из семи фазовых зон, вытравленных в стеклянной подложке с показателем преломления $n = 1.5$, и была рассчитана на телекоммуникационную длину волны $\lambda = 1550$ нм и фокусное расстояние $f = 15$ мкм при глубине травления зон порядка λ для получения максимальной интенсивности в фокусе [16]. Пространственный наклон области ближнепольной фокусировки обеспечивался использованием круговой диафрагмы диаметром 6 мкм, которая размещалась вне оптической оси пластинки и, следовательно, открывала для работы несимметричную конфигурацию френелевских зон. При таких геометрических параметрах мезоразмерной ФП размерный параметр Ми $q = 2\pi r/\lambda = 3.87\pi$ (r – радиус ФП), что соответствует условию существования эффекта фотонной струи [17, 18].

Компьютерное моделирование оптического переключателя проводилось на основе численного решения дифференциальных уравнений Максвелла для векторов поля

Ю.Э.Гейнц, Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634055 Томск, пл. Акад. Зуева, 1

О.В.Минин, И.В.Минин, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Россия, 630108 Новосибирск, ул. Плеханова, 10; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: prof.minin@gmail.com

Поступила в редакцию 7 июня 2021 г.

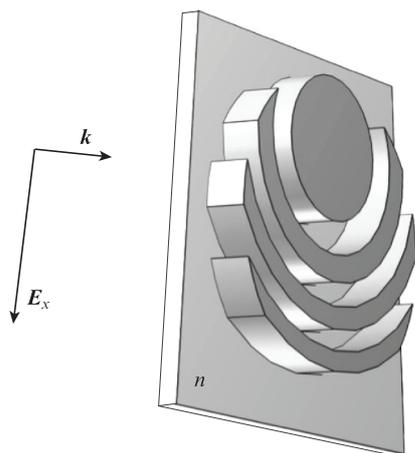


Рис.1. Внеосевая ФП на кварцевой подложке.

в трехмерной пространственной геометрии, реализованного в программном комплексе Lumerical (версия 8). ФП помещалась внутри трехмерной сеточной области, которая располагалась в воздухе (показатель преломления $n_0 = 1$) и окружалась системой идеально поглощающих слоев (PML) для реализации условий свободного излучения на внешних границах расчетного домена. Плоская оптическая волна, освещающая пластинку, распространялась в направлении волнового вектора k по нормали к подложке с оптическим переключателем и для определенности имела начальную амплитуду 1 В/м и линейную поляризацию поля E вдоль оси x . Для дискретизации области расчета использовалась адаптивная пространственная сетка с минимальным и максимальным шагами 0.5 и 50 нм соответственно, обеспечивающая автоматическое сгущение ячеек сетки в областях с большим градиентом диэлектрической постоянной. Временной шаг численной схемы в соответствии с условием Куранта составлял 0.25 фс. При этом суммарное число ячеек N_x (N_y) по всему моделируемому пространству было равно ~ 15 млн.

На рис.2 показано двумерное распределение квадрата амплитуды (интенсивности) плоской оптической волны $|E|^2$ при дифракции на ФП. Видно, что угол γ отклонения пучка, возникающего за частицей искривленного локализованного электромагнитного поля (фотонного

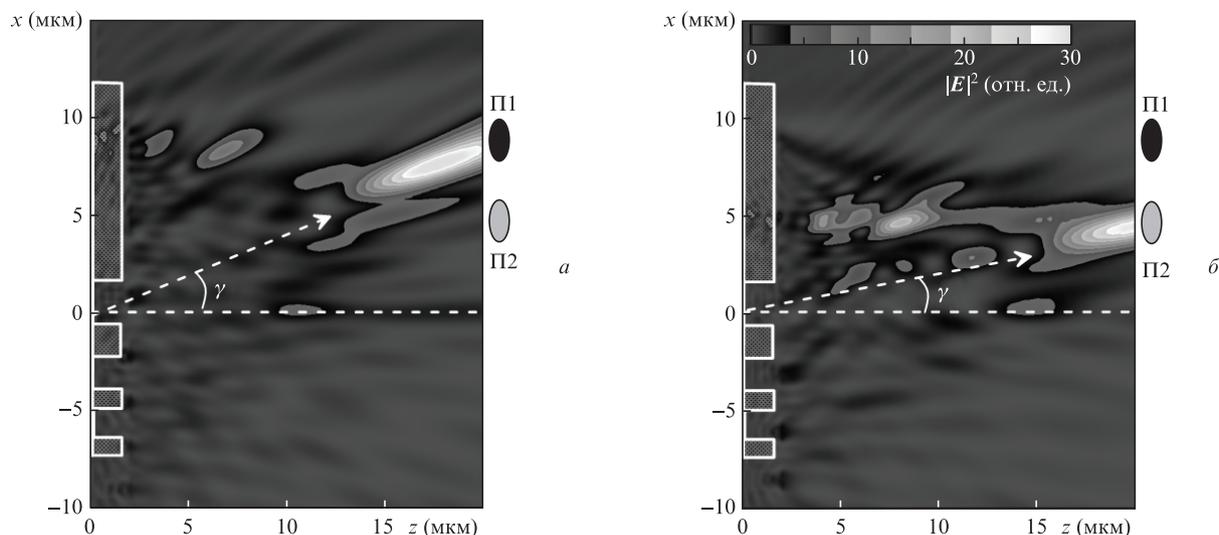
крючка), зависит от длины волны падающего излучения λ . Размещение в плоскости $z = 20$ мкм двух оптических приемников, П1 и П2, обеспечивает различные амплитуды поля в каждом канале при работе на различных длинах волн, т.е. их пространственную коммутацию по уровню оптического сигнала. Очевидно, что надежность срабатывания такого переключателя будет определяться величиной оптической развязки каналов, которая, в свою очередь, зависит от параметров переключающей микроаппаратуры и диапазона длин волн облучения.

Отметим, что для улучшения оптической развязки переключаемых каналов необходимо задавать входную апертуру приемных портов в соответствии с поперечным сечением фотонной струи. В случае мезоволновых [17] ФП характерный диаметр фотонной струи, измеренный в точке максимума интенсивности, составляет порядка длины волны излучения [17, 18]. При распространении (вследствие дифракции) размер струи увеличивается, поэтому в наших исследованиях диаметр приемной апертуры портов был принят равным 2 мкм. В дальнейшем энергия оптического поля, попавшая в приемные порты, может быть аккумулирована миниатюрным фотоприемником, например на основе плазмонной антенны [19, 20], и проанализирована любой дискриминаторной схемой, сравнивающей сигналы от двух портов.

Результат такого сравнения в виде логарифма отношения энергий W_1 и W_2 , поступивших в соответствующие порты, показан на рис.3,б. Здесь приведена зависимость величины относительного энергетического пропускания $S = \lg(W_1/W_2)$ от длины волны облучения, где энергии $W_{1,2}$ представляют собой интеграл от интенсивности поля по площади сечения Σ соответствующего приемного порта:

$$W_{1,2} = \int_{\Sigma_{1,2}} |E|^2 d\sigma.$$

Абсолютные экстремумы на данных кривых могут быть приписаны к альтернативным состояниям фотонного переключателя, когда преобладает сигнал S_1 от первого порта (П1 на рис.3,а) или сигнал S_2 от второго порта (П2). На рис.3,б такие состояния отмечены большими кружками. Разность сигналов $\Delta S = S_1 - S_2$ может слу-

Рис.2. Профили интенсивности оптического поля $|E|^2$ при дифракции плоской волны с $\lambda_1 = 1.31$ мкм (а) и $\lambda_2 = 1.8$ мкм (б) на внеосевой ФП.

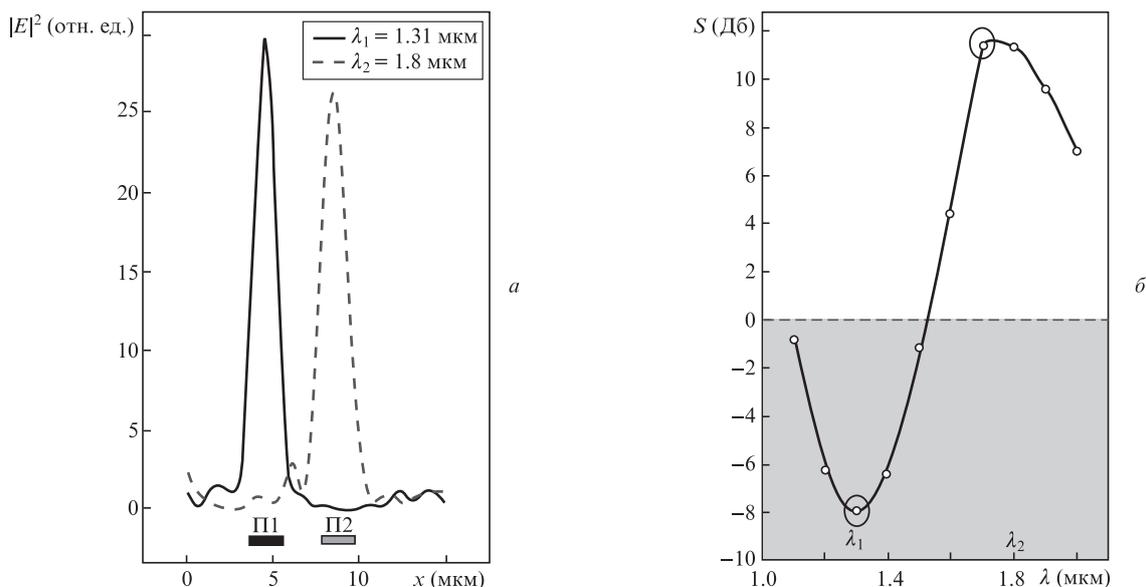


Рис.3. Поперечные профили оптической интенсивности в плоскости $z = 20$ мкм в окрестности портов при разных длинах волн переключения (а) и относительное энергетическое пропускание S приемных портов при изменении длины волны облучения внеосевой ФП (б).

жить мерой оптической изоляции (развязки) каналов коммутации.

Видно, что оптическая изоляция ΔS может достигать 20 дБ, а это при условии фактически мгновенного срабатывания переключателя является хорошим показателем. При этом спектральный диапазон, в котором реализуется переключение состояний, составляет около 500 нм. Следует отметить, что в условиях, когда $\Delta S \approx 0$, обсуждаемый фотонный переключатель начинает функционировать как оптический разветвитель, поскольку энергия поля в обоих каналах выравнивается. Однако вследствие «открытого» характера рассматриваемого типа оптической коммутации, энергопотери на разветвление будут достаточно велики.

Отметим, что вместо оптического переключателя, селективного по длине волны, можно использовать переключение пространственной ориентации фотонного крючка за счет смены поляризации падающего излучения, как это было продемонстрировано, например, в работах [11, 13], но обсуждение этого типа оптических переключателей выходит за рамки настоящей статьи.

Таким образом, нами показана принципиальная возможность создания полностью оптического двухканального миниатюрного (размером порядка длины волны) коммутатора (фотонного крючка) на основе диэлектрической микроструктуры с нарушенной симметрией геометрической формы, выполненного в виде внеосевой ФП. Благодаря уникальному свойству фотонного крючка изменять свой угол загиба в зависимости от длины волны облучения и при этом сохранять экстремальную пространственную локализацию на расстояниях, в несколько раз превышающих дифракционную длину Рэлея [8, 9, 11–13, 17], данный переключатель является хорошим кандидатом для реализации оптической коммутации в современной оптоэлектронике и миниатюрных устройствах «на чипе» без использования микромеханических систем или нелинейных материалов и в отсутствие управления электрическим сигналом, как в работах [21–23].

Работа выполнена в рамках программы развития ТПУ, частично поддержана грантом РФФИ (№ 21-57-

10001) и Министерством науки и высшего образования РФ (Институт оптики атмосферы РАН им. В.Е.Зуева).

1. El-Bawab T.S. *Optical Switching* (Boston, MA: Springer, 2006).
2. Stabile R., Albores-Mejia A., Rohit A., et al. *Microsyst. Nanoeng.*, **2**, 15042 (2016).
3. Seok T.J., Luo J., Huang Z., Kwon K., Henriksson J., Jacobs J., Ochikubo L., Muller R.S., Wu M.C. *APL Photonics*, **4**, 100803 (2019).
4. Han S., Seok T.J., Quack N., Yoo B.W., Wu M.C. *Optica*, **2**, 370 (2015).
5. Strasser T.A., Wagener J.L. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **16**, 1150 (2010).
6. Zhang C., Zhang M., Xie Y., Shi Y., Kumar R., Panepucci R., Dai D. *Photon. Res.*, **8**, 1171 (2020).
7. Singh O., Paulus R. *Opt. Commun.* (2021); <https://doi.org/10.1515/joc-2020-0284>.
8. Dholakia K., Bruce G.D. *Nat. Photonics*, **13**, 225 (2019).
9. Christodoulides D.N., in *The Photonic Hook* (Cham: Springer, 2021, pp vii,viii). DOI:10.1007/978-3-030-66945-4.
10. Notomi M., Tanabe T., Shinya A., Kuramochi E., Taniyama H. *Adv. Opt. Technol.*, ID 568936 (2008). DOI:10.1155/2008/568936.
11. Geints Y., Minin I.V., Minin O.V. *J. Opt.*, **22**, 065606 (2020).
12. Minin I.V., Minin O.V., Liu C., Wei H., Geints Y., Karabchevsky A. *Opt. Lett.*, **45** (17), 4899 (2020).
13. Liu C., Chung H., Minin O.V., Minin I.V. *J. Opt.*, **22** (8), 085002 (2020).
14. Minin I.V., Minin O.V., Golodnikov D.O. *Proc. 8th Int. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering* (Novosibirsk, Russia, 2006, pp 13–18). DOI:10.1109/APEIE.2006.4292375.
15. Su H., Hurd Price H., Jing L., Tian Q., Liu J., Qian K. *Mater. Today Bio*, **4**, 100033 (2019).
16. Ali S., Jacobsen C. *J. Opt. Soc. Am. A*, **37** (3), 374 (2020).
17. Minin I.V., Minin O.V., Geints Y.E. *Ann. Phys. (Berlin)*, **527** (7-8), 491 (2015).
18. Littlefield A., Zhu J., Messinger J.F., Goddard L.L.; https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_32/january_2021/features/photonic_nanojets/.
19. Tang L., Kocabas S., Latif S., et al. *Nat. Photonics*, **2**, 226 (2008).
20. Dorodnyy A., Salamin Y., Ma P., Plestina J., Lassaline N., Mikulik D., Romero-Gomez P., Morral A., Leuthold J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **24** (6), 4600313 (2018).
21. Plander I., Stepanovsky M. *Open Comput. Sci.*, **6**, 116 (2016).
22. Li M., Liang H., Luo R., He Y., Ling J., Lin Q. *Optica*, **6**, 860 (2019).
23. Jia S., Peng J., Bian J., Zhang S., Xu S., Zhang B. *Micromachines*, **12**, 221 (2021).