

## Концепция миниатюрного полностью оптического пространственного переключателя на основе эффекта фотонного крючка

Ю.Э. Гейнц<sup>1</sup>, О.В. Минин<sup>2,3</sup>, И.В. Минин<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1;

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
630108, Россия, г. Новосибирск, Плеханового, 10;

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Россия, г. Томск, Ленина, 30

### Аннотация

В статье обсуждаются основные свойства новой концепции полностью оптического диэлектрического двухканального селективного по длине волны коммутатора на основе эффекта фотонного крючка. Рассмотрен прототип такого устройства на диэлектрических микроструктурах с нарушенной симметрией как геометрической формы, так и оптических свойств без применения микромеханических устройств или нелинейных материалов. Благодаря уникальному свойству фотонного крючка изменять свою кривизну в зависимости от длины волны светового облучения, данный переключатель является перспективным кандидатом для реализации оптической коммутации в современной оптоэлектронике и миниатюрных устройствах «на чипе». На основе численного FDTD-моделирования показано, что оптическая изоляция коммутируемых каналов для переключателя с линейными размерами около  $(6\lambda)^3$  на базе Янус-частицы может достигать примерно 18–20 дБ в диапазоне длин волн 1,5–1,9 мкм.

**Ключевые слова:** оптический переключатель, Янус-частица, фотонный крючок, переключатель.

**Цитирование:** Гейнц, Ю.Э. Концепция миниатюрного полностью оптического пространственного переключателя на основе эффекта фотонного крючка / Ю.Э. Гейнц, О.В. Минин, И.В. Минин // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 6. – С. 848-852. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-926.

**Citation:** Geints YE, Minin OV, Minin IV. The concept of a miniature all-optical space switch based on the photonic hook effect. Computer Optics 2021; 45(6): 848-852. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-926.

### Введение

В современной «эре больших данных» серьёзная проблема заключается в осуществлении возможности передачи, коммутации и обработки больших объёмов информации. Оптическая коммутация и оптические переключатели являются ключевым элементом в переносимых сетевых коммуникациях [1, 2].

Значительный рост коммуникаций данных и быстрое развитие технологии плотного мультиплексирования с разделением по длине волны (DWDM) создают потребность в более надёжных и гибких средствах управления сигналами. В частности, возможность оптимизации, маршрутизации и коммуникации данных оптическими методами становится критически важной. Кроме того, современные требования к миниатюризации устройств диктуют необходимость разработки оптических компонентов и систем «на чипе», поскольку быстрая перенастройка в режиме реального времени с использованием технологий интегральных оптических схем обеспечит энергоэффективную и прозрачную передачу и коммутацию данных с высокой скоростью (в отличие от

коммутирующих схем на основе электроники, требующих управления внешним электрическим сигналом) [3]. Оптические переключатели широко используются и при тестировании оптоволоконных компонентов, и для «нейроморфных» оптических вычислений, имитирующих функции мозга при обработке и хранении информации [4].

Сегодня известны различные принципы построения оптических переключателей [1, 2, 5–9]. Распространение получили переключатели на основе зеркал или линз, которые должны поворачиваться или менять конфигурацию для переключения направления света [10–13]. Однако они достаточно медленные. Другой класс систем включает селективные по длине волны переключатели [14–17], которые привлекли большое внимание из-за их способности независимо маршрутизировать каналы с разными длинами волн, поскольку *фотонные сети должны осуществлять мультиплексирование и маршрутизацию с использованием только оптических технологий, основываясь на свойствах оптического излучения с различными длинами волн.*

Известные оптические переключатели такого типа по сути представляют собой комбинацию спек-

трометра на дифракционной решётке с пространственным модулятором света [1]. Ниже в данной статье мы предлагаем новую концепцию селективного по длине волны полностью оптического переключателя на основе недавно открытых структурированных пространственно локализованных световых пучков типа фотонного крючка [18]. Эта концепция позволяет реализовать немеханический и полностью оптический переключатель «на кристалле», который изменяет направление выходного света без использования нелинейных материалов [19].

### 1. Концепция оптического переключения на основе фотонного крючка

Физический принцип, на базе которого мы предлагаем осуществить бесконтактную спектрально селективную коммутацию оптических каналов, основан на эффекте генерации криволинейной фотонной струи (фотонного крючка) при распространении оптической волны через специфический дифракционный оптический элемент (диэлектрическую микрочастицу), придающую волне асимметричную фазу. В дальнейшем после того, как волна покинет частицу, искривление волнового фронта приводит к асимметрии поперечного распределения амплитуды поля и фокусировке части излучения под определённым углом к направлению падения в виде загнутой фотонной струи или фотонного крючка [18, 20]. Такая асимметрия фазы может быть достигнута несколькими способами. Один из способов состоит в использовании оптически однородной частицы, но имеющей асимметрию геометрической формы [21], или способ, использующий асимметрию освещающего пучка. Например, это может быть прямоугольная призма, цилиндр [22] или эллипсоид при боковом освещении [23], асимметричная планарная линза в форме внеосевой фазовой пластинки [24] или дифракция на угловой фазовой ступеньке [25, 26] и т.д. Другой способ получения искривлённого фотонного крючка использует геометрически симметричные частицы, но имеющие специально созданную асимметрию показателя преломления. Это так называемые Янус-частицы, получаемые путём соединения двух и более материалов с различными оптическими свойствами [27].

Важным свойством фотонного крючка для реализации, например, функции оптического переключателя, является зависимость угла искривления его плеч от длины волны облучения [18, 26]. Поэтому при определённой пространственной конфигурации фотонной микроструктуры и зон приёма можно добиться изменения уровня оптического сигнала в каждом из каналов при изменении длины волны излучения.

Рассматриваемый тип асимметричной фотонной структуры, использовавшейся в численном моделировании, представлен на рис. 1. Он представляет собой прямоугольный Янус-брусочек, имеющий различные показатели преломления половинок  $n_1 = 1,5$  и

$n_2 = 2$ . Геометрические размеры бруска выбирались из условия получения наилучшего искривления фотонного крючка (максимальной стрелки прогиба) в диапазоне  $\lambda$  от 1200 нм до 2000 нм на основе результатов работы [20] и были следующими:  $L = 9$  мкм,  $h = 4,5$  мкм,  $d = L$ .

### 2. Компьютерная модель оптического переключателя

Компьютерное моделирование оптического переключателя (ОП) осуществлялось на основе численного решения дифференциальных уравнений Максвелла для векторов поля в трёхмерной пространственной геометрии с помощью техники finite-differencetime-domain (FDTD), реализованной в компьютерном пакете Lumerical (ver. 8). Фотонная структура – дифракционный оптический элемент (ДОЭ) помещалась внутри трёхмерной сеточной области, которая располагалась в воздухе (показатель преломления  $n_0 = 1$ ) и окружалась системой идеально поглощающих слоёв (PML) для реализации условий свободного излучения на внешних границах расчётного домена.

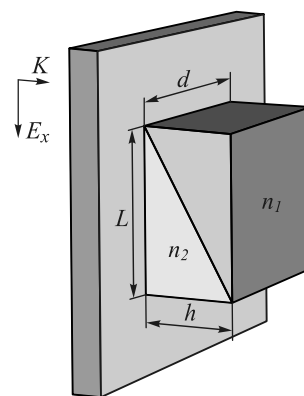


Рис. 1. Мезоволновый ДОЭ в форме Янус-бруска на бесконечной кварцевой подложке

Плоская оптическая волна, освещающая пластинку, распространялась в направлении волнового вектора  $\mathbf{k}$  по нормали к подложке с ОП и для определённости имела начальную амплитуду 1 В/м и линейную поляризацию вдоль оси  $x$ . Для дискретизации области расчёта использовалась адаптивная пространственная сетка с минимальным и максимальным шагами 0,5 нм и 50 нм соответственно, обеспечивающая автоматическое сгущение сеточных ячеек 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  $\Delta x \Delta y \Delta z$  по всему моделируемому пространству было порядка 14 млн.

### 3. Результаты моделирования

На рис. 2а, б показано двумерное распределение квадрата амплитуды (интенсивности) плоской оптической волны  $|\mathbf{E}|^2$  при рассеянии на прямоугольном Янус-бруске, составленном из двух оптических мате-

риалов с показателями преломления  $n_1=1,5$  и  $n_2=2$ . Как видно, исследуемая структура производит локализованную искривленную фотонную струю, имеющую наклон в сторону более массивной части частицы. Для двухкомпонентной Янус-частицы наблюдается наклон плеча фотонного крючка в сторону половинки с большим показателем преломления ( $n_2$ ). Данный параметр важен, поскольку определяет минимальную дистанцию, на которой возможно осуществить пространственное разделение приемных каналов заданной апертуры, а следовательно, напрямую влияет на компактность предлагаемого переключателя.

Хорошо видно, что угол изгиба  $\gamma$ , возникающего за частицей фотонного крючка, различен. Для длины волны облучения  $\lambda = 1550$  нм он составляет порядка  $21^\circ$ , а на  $\lambda = 2000$  нм имеем  $\gamma \approx 15^\circ$ . При размещении в плоскости  $z = 30$  мкм двух оптических приемников, обозначенных на рисунках «порт 1» и «порт 2», это обеспечивает различную амплитуду поля в каждом из каналов, 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 микрочастицы и диапазона длин волн облучения.

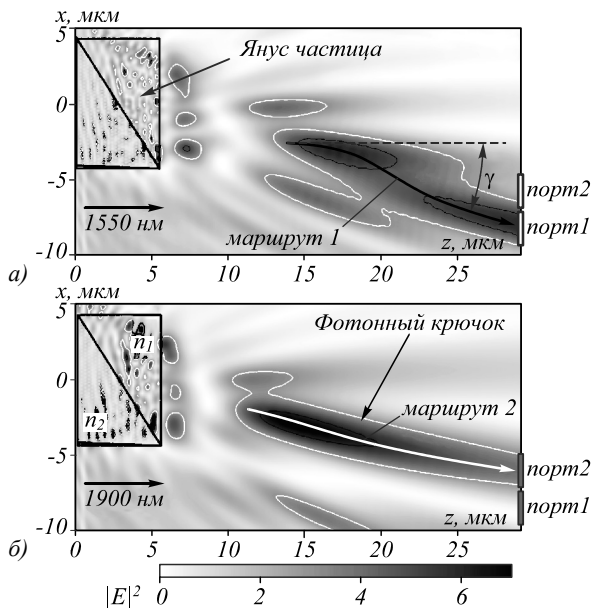


Рис. 2. Принцип работы оптического переключателя на базе фотонного крючка: (а, б) продольное распределение усредненного квадрата амплитуды оптического поля  $|E|^2$  от Янус-бруска на длинах волн переключения каналов 1 и 2 при дифракции плоской волны

Отметим, что для улучшения оптической развязки переключаемых каналов необходимо задавать входную апертуру приемных портов по размеру поперечного сечения фотонной струи. В случае мезоволновых ДОЭ произвольной формы характерный диаметр фотонной струи, измеренный в точке максимума ин-

тенсивности, составляет порядка длины волны излучения [21, 29]. При распространении, вследствие дифракции, размер струи уширяется, поэтому в наших исследованиях диаметр приемной апертуры портов был взят 2 мкм. В дальнейшем энергия оптического поля, попавшая в приемные порты, может быть аккумулирована миниатюрным фотоприемником, например, на основе плазмонной антенны [30], и проанализирована любой дискриминаторной схемой, сравнивающей сигналы от обоих портов.

Результат такого сравнения в виде логарифма отношения энергии  $E_1$  и  $E_2$ , пришедшей в соответствующие порты, показан на рис. 3. Здесь приведена зависимость величины относительного энергетического пропускания ( $S$ -параметр)  $S = \log_{10}(E_1/E_2)$  от длины волны облучения, где

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

представляет собой интеграл от интенсивности поля по площади сечения  $\Sigma$  соответствующего приемного порта. Абсолютные экстремумы на данных кривых могут быть приписаны к альтернативным состояниям фотонного переключателя, когда преобладает сигнал  $S_1$  от первого порта (состояние «1»), или сигнал  $S_2$  от второго порта (состояние «2»). На рисунке такие состояния отмечены кружками разного цвета. Разность сигналов ( $S_1 - S_2$ ) может служить мерой оптической изоляции (развязки) каналов коммутации.

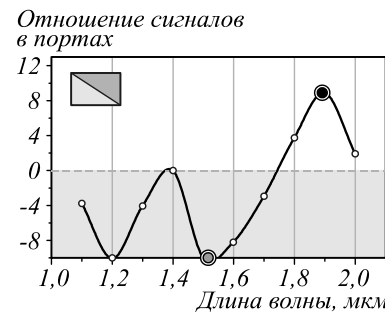


Рис. 3. Относительное энергетическое пропускание приемных портов при изменении длины волны облучения переключающей фотонной структуры в форме Янус-бруска

Как видно, оптическая изоляция может достигать 18–20 дБ, что при условии фактически мгновенной скорости срабатывания является хорошим показателем. Следует отметить, что в условиях, когда  $S \approx 0$ , обсуждаемый фотонный переключатель начинает функционировать как оптический разветвитель, поскольку энергия поля в обоих каналах сравнивается. При этом вследствие «открытого» характера рассматриваемого типа оптической коммутации энергопотери на разветвление будут достаточно велики. Так, для рассмотренного варианта в порт 1 приходит около 10% всей энергии излучения, распределенной в области  $400 \text{ мкм}^2$ .

Заметим, что вместо оптического переключателя с разделением по длине волны можно использовать переключение пространственной ориентации фотонного крючка за счет смены поляризации падающего излучения, как это было продемонстрировано в [20, 23, 29], но рассмотрение этого типа оптических переключателей выходит за рамки настоящей статьи.

### Заключение

Мы показали принципиальную возможность создания полностью оптического двухканального миниатюрного коммутатора на основе эффекта фотонного крючка, реализованного на диэлектрических микроструктурах с нарушенной симметрией геометрической формы и оптических свойств. Благодаря уникальному свойству фотонного крючка изменять свой угол загиба в зависимости от длины волны светового облучения и при этом сохранять экстремальную пространственную локализацию на дистанциях, кратно превышающих дифракционную длину Рэлея, данный переключатель является хорошим кандидатом для реализации оптической коммутации в современной оптоэлектронике и миниатюрных устройствах «на чипе» без использования микро-механических систем или нелинейных материалов, и не требующего управлением электрическим сигналом, как в [31]. Наилучшая оптическая изоляция коммутируемых каналов, которую удалось достичь для переключателя с минимальными линейными размерами порядка  $(6\lambda)^3$  на базе оптически контрастной Янус-частицы, составляет около 18–20 дБ в диапазоне рассмотренных коммуникационных длин волн излучения. Заметим, что проведение «полномасштабной» оптимизации характеристик оптического переключателя с учетом дисперсии свойств материалов и технологии изготовления в данной работе не предполагалось, а демонстрировалась лишь соответствующая концепция.

Отметим, что благодаря простой конструкции переключающего элемента масштаба длины волны такие высокоточные технологии 3D-печати, как SLA [33] и двухфотонная полимеризация TPP [34], могут быть использованы для изготовления рассмотренных мезомасштабных элементов, работающих в оптическом или ТГц-диапазонах [35] соответственно, что будет опубликовано в дальнейшем.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках программы развития ТПУ и частично поддержана РФФИ (№ 21-57-10001, 20-57-S52001) и Министерством науки и высшего образования РФ (Институт оптики атмосферы РАН им. В.Е. Зуева).

### Литература

1. **El-Bawab, T.S.** Optical switching / T.S. El-Bawab. – Boston, MA: Springer, 2006. – DOI: 10.1007/0-387-29159-8.

2. **Cheng, Q.** Recent advances in optical technologies for data centers: a review / Q. Cheng, M. Bahadori, M. Glick, S. Rumley, K. Bergman // *Optica*. – 2018. – Vol. 5. – P. 1354-1370. – DOI: 10.1364/OPTICA.5.001354.
3. **Stabile, R.** Integrated optical switch matrices for packet data networks / R. Stabile, A. Albores-Mejia, A. Rohit [et al.] // *Microsystems and Nanoengineering*. – 2016. – Vol. 2. – P. 15042. – DOI: 10.1038/micronano.2015.42.
4. **Cheng, Z.** On-chip photonic synapse / Z. Cheng, C. Rios, W.H.P. Pernice, C.D. Wright, H. Bhaskaran // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3, Issue 9. – e1700160. – DOI: 10.1126/sciadv.1700160.
5. **Virgilio, M.** CMOS-compatible optical switching concept based on strain-induced refractive-index tuning / M. Virgilio, B. Witzigmann, G. Bolognini, S. Guha, T. Schroeder, G. Capellini // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, Issue 5. – P. 5930-5940. – DOI: 10.1364/OE.23.005930.
6. **Ravel, K.** Optical switch matrix development for new concepts of photonic based flexible telecom payloads / K. Ravel, C. Koechlin, E. Prevost, T. Bomer, R. Poirier, L. Tonck, G. Guinde, M. Beaumel, N. Parsons, M. Enrico, S. Barker // *Proceedings of SPIE*. – 2018. – Vol. 11180. – P. 111803H. – DOI: 10.1117/12.2536044.
7. **Jia, H.** WDM-compatible multimode optical switching system-on-chip / H. Jia, S. Yang, T. Zhou, S. Shao, X. Fu, L. Zhang, L. Yang // *Nanophotonics*. – 2019. – Vol. 8, Issue 5. – P. 889-898. – DOI: 10.1515/nanoph-2019-0005.
8. **Williamson, I.A.D.** Broadband optical switch based on an achromatic photonic gauge potential in dynamically modulated waveguides / I.A.D. Williamson, S. Fan // *Physical Review Applied*. – 2019. – Vol. 11, Issue 5. – P. 054035. – DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.054035.
9. **Ren, H.** Liquid-based infrared optical switch / H. Ren, S. Xu, Y. Liu, S.-T. Wu // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Vol. 101, Issue 4. – P. 041104. – DOI: 10.1063/1.4738995.
10. **Li, L.** Optical switch based on electrowetting liquid lens / L. Li, C. Liu, H.-R. Peng, Q.-H. Wang // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – Vol. 111, Issue 10. – P. 103103. – DOI: 10.1063/1.4717715.
11. **Seok, T.J.** Large-scale broadband digital silicon photonic switches with vertical adiabatic couplers / T.J. Seok, N. Quack, S. Han, R.S. Muller, M.C. Wu // *Optica*. – 2016. – Vol. 3, Issue 1. – P. 64-70. – DOI: 10.1364/OPTICA.3.000064.
12. **Bulgan, E.** Submicron silicon waveguide optical switch driven by microelectromechanical actuator / E. Bulgan, Y. Kanamori, K. Hane // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92, Issue 10. – P. 101110. – DOI: 10.1063/1.2892677.
13. **Han, S.** Large-scale polarization-insensitive silicon photonic MEMS switches / S. Han, T.J. Seok, K. Yu, N. Quack, R.S. Muller, M.C. Wu // *Journal of Lightwave Technology*. – 2018. – Vol. 36, Issue 10. – P. 1824-1830. – DOI: 10.1109/JLT.2018.2791502.
14. **Seok, T.J.** Silicon photonic wavelength cross-connect with integrated MEMS switching / T.J. Seok, J. Luo, Z. Huang, K. Kwon, J. Henriksson, J. Jacobs, L. Ochikubo, R.S. Muller, M.C. Wu // *APL Photonics*. – 2019. – Vol. 4, Issue 10. – P. 100803. – DOI: 10.1063/1.5120063.
15. **Han, S.** Large-scale silicon photonic switches with movable directional couplers / S. Han, T.J. Seok, N. Quack, B.-W. Yoo, M.C. Wu // *Optica*. – 2015. – Vol. 2, Issue 4. – P. 370-375. – DOI: 10.1364/OPTICA.2.000370.
16. **Strasser, T.A.** Wavelength-selective switches for ROADM applications / T.A. Strasser, J.L. Wagener // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2010. – Vol. 16, Issue 5. – P. 1150-1157. – DOI: 10.1109/JSTQE.2010.2049345.
17. **Zhang, C.** Wavelength-selective  $2 \times 2$  optical switch based on a  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ -assisted microring / C. Zhang, M. Zhang,

- Y. Xie, Y. Shi, R. Kumar, R.R. Panepucci, D. Dai // Photonics Research. – 2020. – Vol. 8, Issue 7. – P. 1171-1176. – DOI: 10.1364/PRJ.393513.
18. **Christodoulides, D.N.** Foreword / D.N. Christodoulides. – In: The photonic hook / O.V. Minin, I.V. Minin. – Cham: Springer, 2021. – P. vii-viii. – DOI: 10.1007/978-3-030-66945-4.
  19. **Notomi, M.** On-chip all-optical switching and memory by silicon photonic crystal nanocavities / M. Notomi, T. Tanabe, A. Shinya, E. Kuramochi, H. Taniyama // Advances in Optical Technologies. – 2008. – Vol. 2008. – 568936 (10 p.) – DOI: 10.1155/2008/568936.
  20. **Geints, Y.E.** Tailoring 'photonic hook' from Janus dielectric microbar / Y.E. Geints, I.V. Minin, O.V. Minin // Journal of Optics. – 2020. – Vol. 22, Issue 6. – 065606. – DOI: 10.1088/2040-8986/ab8e9e.
  21. **Minin, I.V.** Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects / I.V. Minin, O.V. Minin, Yu.E. Geints // Annalen der Physik. – 2015. – Vol. 527, Issues 7-8. – P. 491-497. – DOI: 10.1002/andp.201500132.
  22. **Minin, I.V.** Experimental demonstration of tunable photonic hook by partially illuminated dielectric microcylinder / I.V. Minin, O.V. Minin, C.-Y. Liu, H.-D. Wei, Y. Geints, A. Karabchevsky // Optics Letters. – 2020. – Vol. 45, Issue 17. – P. 4899-4902. – DOI: 10.1364/OL.402248.
  23. **Liu, C.-Y.** Shaping photonic hook via well-controlled illumination of finite-size graded-index micro-ellipsoid / C.-Y. Liu, H.-J. Chung, O.V. Minin, I.V. Minin // Journal of Optics. – 2020. – Vol. 22, Issue 8. – 085002. – DOI: 10.1088/2040-8986/ab9aaf.
  24. **Minin, I.V.** Simple free-space method for measurement of dielectric constant by means of diffractive optics with new capabilities / I.V. Minin, O.V. Minin, D.O. Golodnikov // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. – 2006. – P. 13-18. – DOI: 10.1109/APEIE.2006.4292375.
  25. **Kopylov, Y.V.** Diffraction phenomena inside thick Fresnel zone plates / Y.V. Kopylov, A.V. Popov, A.V. Vinogradov // Radio Science. – 1996. – Vol. 31, Issue 6. – P. 1815-1822. – DOI: 10.1029/96RS01939.
  26. **Котляр, В.В.** Гиперболическая фотонная струя / В.В. Котляр, С.С. Стафеев, А.А. Ковалёв // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 300-307.
  27. **Su, H.** Janus particles: design, preparation, and biomedical applications / H. Su, C.-A. Hurd Price, L. Jing, Q. Tian, J. Liu, K. Qian // Materials Today Bio. – 2019. – Vol. 4. – 100033. – DOI: 10.1016/j.mtbio.2019.100033.
  28. **Minin, O.V.** The photonic hook. From optics to acoustics and plasmonics / O.V. Minin, I.V. Minin. – Cham: Springer, 2021. – ISBN: 978-3-030-66944-7.
  29. **Minin, I.V.** Diffractive optics and nanophotonics. Resolution below the diffraction limit / I.V. Minin, O.V. Minin. – Cham: Springer, 2016. – ISBN: 978-3-319-24251-4.
  30. **Tang, L.** Nanometre-scale germanium photodetector enhanced by a near-infrared dipole antenna / L. Tang, S. Kocabas, S. Latif, A.K. Okyay, D.-S. Ly-Gagnon, K.C. Saraswatand, D.A.B. Miller // Nature Photonics. – 2008. – Vol. 2. – P. 226-229. – DOI: 10.1038/nphoton.2008.30.
  31. **Li, M.** Photon-level tuning of photonic nanocavities / M. Li, H. Liang, R. Luo, Y. He, J. Ling, Q. Lin // Optica. – 2019. – Vol. 6, Issue 7. – P. 860-863. – DOI: 10.1364/OPTICA.6.000860.
  32. **Blasco, E.** 3D printing enabled by light and enabling the manipulation of light: feature issue introduction / E. Blasco, S. Maruo, X. Xu, M. Wegener // Optical Materials Express. – 2020. – Vol. 10, Issue 12. – P. 3414-3416. – DOI: 10.1364/OME.415864.
  33. **Berglund, G.D.** Fabrication of optical components using a consumer-grade lithographic printer / G.D. Berglund, T.S. Tkaczyk // Optics Express. – 2019. – Vol. 27, Issue 21. – P. 30405-30420. – DOI: 10.1364/OE.27.030405.
  34. **Dietrich, P.-I.** In situ 3D nanoprinting of free-form coupling elements for hybrid photonic integration / P.-I. Dietrich, M. Blaicher, I. Reuter, M. Billah, T. Hoose, A. Hofmann, C. Caer, R. Dangel, B. Offrein, U. Troppenz, M. Moehrl, W. Freude, C. Koos // Nature Photonics. – 2018. – Vol. 12. – P. 241-247. – DOI: 10.1038/s41566-018-0133-4.
  35. **Castro-Camus, E.** Additive manufacture of photonic components for the terahertz band / E. Castro-Camus, M. Koch, A.I. Hernandez-Serrano // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 127, Issue 21. – 210901. – DOI: 10.1063/1.5140270.

#### Сведения об авторах

**Гейнц Юрий Эльмарович**, 1963 года рождения, в 1986 году окончил Томский государственный университет по специальности «Оптические приборы и системы», работает главным научным сотрудником в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, доктор физико-математических наук. Область научных интересов: компьютерная оптика, нанофотоника, нелинейная оптика волновых процессов. E-mail: [ygeints@iao.ru](mailto:ygeints@iao.ru).

**Минин Олег Владиленович**, 1960 года рождения, в 1982 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Физик», работает главным научным сотрудником в Сибирском государственном университете геосистем и технологий, доктор технических наук, чл.-корр. Метрологической академии России. Автор и соавтор более 300 научных трудов (в том числе 10 монографий, включая изданные за рубежом), более 100 изобретений и патентов РФ. Область научных интересов: компьютерная оптика, нано- и мезоразмерная фотоника, оптика ближнего поля. E-mail: [oleg.minin@ngs.ru](mailto:oleg.minin@ngs.ru).

**Минин Игорь Владиленович**, 1960 года рождения, в 1982 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Физик», работает главным научным сотрудником в Сибирском государственном университете геосистем и технологий, доктор технических наук, чл.-корр. Метрологической академии России. Автор и соавтор более 300 научных трудов (в том числе 10 монографий, включая изданные за рубежом), более 100 изобретений и патентов РФ. Область научных интересов: компьютерная оптика, нано- и мезоразмерная фотоника, оптика ближнего поля. E-mail: [prof.minin@gmail.com](mailto:prof.minin@gmail.com).

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 24 мая 2021 г. Окончательный вариант – 5 июля 2021 г.

---

# The concept of a miniature all-optical space switch based on the photonic hook effect

Y.E. Geints<sup>1</sup>, O.V. Minin<sup>2,3</sup>, I.V. Minin<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Zuev square, 634021, Tomsk, Russia,

<sup>2</sup>Tomsk State Polytechnic University, Tomsk, 36 Lenin Avenue, 634050, Russia,

<sup>3</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, 63108, Russia

## Abstract

We propose and discuss main properties of a new concept of an all-optical dielectric two-channel wavelength-selective switch based on the photonic hook effect. A prototype of such a device based on dielectric microstructures with broken symmetry of both geometric shape and optical properties without the use of micromechanical devices or nonlinear materials is considered. Due to the unique property of the photonic hook to change its curvature depending on the wavelength of illuminating light, this switch is a promising candidate for the implementation of optical switching in modern optoelectronics and miniature devices "on a chip". Based on numerical FDTD simulations, it is shown that the optical isolation of switched channels for a switch with linear dimensions of about  $(6\lambda)^3$  based on a Janus particle can reach about 18-20 dB in the wavelength range of 1.5–1.9 microns.

**Keywords:** optical switch, Janus particle, photonic hook, switch.

**Citation:** Geints YE, Minin OV, Minin IV. The concept of a miniature all-optical space switch based on the photonic hook effect. *Computer Optics* 2021; 45(6): 848-852. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-926.

**Acknowledges:** This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 21-57-10001), TPU development program and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS).

## References

- [1] El-Bawab TS. Optical switching. Boston, MA: Springer; 2006. DOI: 10.1007/0-387-29159-8.
  - [2] Cheng Q, Bahadori M, Glick M, Rumley S, Bergman K. Recent advances in optical technologies for data centers: a review. *Optica* 2018; 5: 1354-1370. DOI: 10.1364/OPTICA.5.001354.
  - [3] Stabile R, Albores-Mejia A, Rohit A, et al. Integrated optical switch matrices for packet data networks. *Microsyst Nanoeng* 2016; 2: 15042. DOI: 10.1038/micronano.2015.42.
  - [4] Cheng Z, Ríos C, Pernice WHP, Wright CD, Bhaskaran H. On-chip photonic synapse. *Sci Adv* 2017; 3(9): e1700160. DOI: 10.1126/sciadv.1700160.
  - [5] Virgilio M, Witzigmann B, Bolognini G, Guha S, Schroeder T, Capellini G. CMOS-compatible optical switching concept based on strain-induced refractive-index tuning. *Opt Express* 2015; 23(5): 5930-5940. DOI: 10.1364/OE.23.005930.
  - [6] Ravel K, Koechlin C, Prevost E, Bomer T, Poirier R, Tonck L, Guinde G, Beaumel M, Parsons N, Enrico M, Barker S. Optical switch matrix development for new concepts of photonic based flexible telecom payloads. *Proc SPIE* 2018; 11180: 111803H. DOI: 10.1117/12.2536044.
  - [7] Jia H, Yang S, Zhou T, Shao S, Fu X, Zhang L, Yang L. WDM-compatible multimode optical switching system-on-chip. *Nanophotonics* 2019; 8(5): 889-898; DOI: 10.1515/nanoph-2019-0005.
  - [8] Williamson IAD, Fan S. Broadband optical switch based on an achromatic photonic gauge potential in dynamically modulated waveguides. *Phys Rev Appl* 2019; 11(5): 054035. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.054035.
  - [9] Ren H, Xu S, Liu Y, Wu S-T. Liquid-based infrared optical switch. *Appl Phys Lett* 2012; 101(4): 041104. DOI: 10.1063/1.4738995.
  - [10] Li L, Liu C, Peng H-R, Wang Q-H. Optical switch based on electrowetting liquid lens. *J Appl Phys* 2012; 111(10): 103103. DOI: 10.1063/1.4717715.
  - [11] Seok TJ, Quack N, Han S, Muller RS, Wu MC. Large-scale broadband digital silicon photonic switches with vertical adiabatic couplers. *Optica* 2016; 3(1): 64-70. DOI: 10.1364/OPTICA.3.000064.
  - [12] Bulgan E, Kanamori Y, Hane K. Submicron silicon waveguide optical switch driven by microelectromechanical actuator. *Appl Phys Lett* 2008; 92(10): 101110. DOI: 10.1063/1.2892677.
  - [13] Han S, Seok TJ, Yu K, Quack N, Muller RS, Wu MC. Large-scale polarization-insensitive silicon photonic MEMS switches. *J Lightw Technol* 2018; 36(10): 1824-1830. DOI: 10.1109/JLT.2018.2791502.
  - [14] Seok TJ, Luo J, Huang Z, Kwon K, Henriksson J, Jacobs J, Ochikubo L, Muller RS, Wu MC. Silicon photonic wavelength cross-connect with integrated MEMS switching. *APL Photonics* 2019; 4(10): 100803. DOI: 10.1063/1.5120063.
  - [15] Han S, Seok TJ, Quack N, Yoo B-W, Wu MC. Large-scale silicon photonic switches with movable directional couplers. *Optica* 2015; 2(4): 370-375. DOI: 10.1364/OPTICA.2.000370.
  - [16] Strasser TA, Wagener JL. Wavelength-selective switches for ROADM applications. *IEEE J Sel Top Quantum Electron* 2010; 16(5): 1150-1157. DOI: 10.1109/JSTQE.2010.2049345.
  - [17] Zhang C, Zhang M, Xie Y, Shi Y, Kumar R, Panepucci RR, Dai D. Wavelength-selective  $2 \times 2$  optical switch based on a  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ -assisted microring. *Photon Res* 2020; 8(7): 1171-1176. DOI: 10.1364/PRJ.393513.
-

- [18] Christodoulides DN. Foreword. In Book: Minin OV, Minin IV. The photonic hook. Cham: Springer; 2021: vii-viii. DOI: 10.1007/978-3-030-66945-4.
- [19] Notomi M, Tanabe T, Shinya A, Kuramochi E, Taniyama H. On-chip all-optical switching and memory by silicon photonic crystal nanocavities. *Adv Opt Technol* 2008; 2008: 568936. DOI: 10.1155/2008/568936.
- [20] Geints YE, Minin IV, Minin OV. Tailoring ‘photonic hook’ from Janus dielectric microbar. *J Opt* 2020; 22(6): 065606. DOI: 10.1088/2040-8986/ab8e9e.
- [21] Minin IV, Minin OV, Geints YuE. Localized EM and photonic jets from non-spherical and non-symmetrical dielectric mesoscale objects. *Annalen der Physik* 2015; 527(7-8): 491-497. DOI: 10.1002/andp.201500132.
- [22] Minin IV, Minin OV, Liu C-Y, Wei H-D, Geints Y, Karabchevsky A. Experimental demonstration of tunable photonic hook by partially illuminated dielectric microcylinder. *Opt Lett* 2020; 45(17): 4899-4902. DOI: 10.1364/OL.402248.
- [23] Liu C-Y, Chung H-J, Minin OV, Minin IV. Shaping photonic hook via well-controlled illumination of finite-size graded-index micro-ellipsoid. *J Opt* 2020; 22(8): 085002. DOI: 10.1088/2040-8986/ab9aaf.
- [24] Minin IV, Minin OV, Golodnikov DO. Simple free-space method for measurement of dielectric constant by means of diffractive optics with new capabilities. *Proc 8<sup>th</sup> Int Conf on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering* 2006: 13-18. DOI: 10.1109/APEIE.2006.4292375.
- [25] Kopylov YV, Popov AV, Vinogradov AV. Diffraction phenomena inside thick Fresnel zone plates. *Radio Sci* 1996; 31(6): 1815-1822. DOI: 10.1029/96RS01939.
- [26] Kotlyar VV, Stafeyev SS, Kovalev AA. Hyperbolic photonic jet. *Computer Optics* 2012; 36(3): 300-307.
- [27] Su H, Hurd Price C-A, Jing L, Tian Q, Liu J, Qian K. Janus particles: design, preparation, and biomedical applications. *Materials Today Bio* 2019; 4: 100033. DOI: 10.1016/j.mtbio.2019.100033.
- [28] Minin OV, Minin IV. The photonic hook.. From optics to acoustics and plasmonics. Cham: Springer; 2021. ISBN: 978-3-030-66944-7.
- [29] Minin IV, Minin OV. Diffractive optics and nanophotonics. Resolution below the diffraction limit. Cham: Springer; 2016. ISBN: 978-3-319-24251-4.
- [30] Tang L, Kocabas S, Latif S, Okyay AK, Ly-Gagnon D-S, Saraswatand KC, Miller DAB. Nanometre-scale germanium photodetector enhanced by a near-infrared dipole antenna. *Nat Photon* 2008; 2: 226-229. DOI: 10.1038/nphoton.2008.30.
- [31] Li M, Liang H, Luo R, He Y, Ling J, Lin Q. Photon-level tuning of photonic nanocavities. *Optica* 2019; 6(7): 860-863. DOI: 10.1364/OPTICA.6.000860.
- [32] Blasco E, Maruo S, Xu X, Wegener M. 3D printing enabled by light and enabling the manipulation of light: feature issue introduction. *Opt Mat Express* 2020; 10(12): 3414-3416. DOI: 10.1364/OME.415864.
- [33] Berglund GD, Tkaczyk TS. Fabrication of optical components using a consumer-grade lithographic printer. *Opt Express* 2019; 27(21): 30405-30420. DOI: 10.1364/OE.27.030405.
- [34] Dietrich P-I, Blaicher M, Reuter I, Billah M, Hoose T, Hofmann A, Caer C, Dangel R, Offrein B, Troppenz U, Moehrl M, Freude W, Koos C. In situ 3D nanoprinting of free-form coupling elements for hybrid photonic integration. *Nat Photonics* 2018; 12: 241-247. DOI: 10.1038/s41566-018-0133-4.
- [35] Castro-Camus E, Koch M, Hernandez-Serrano AI. Additive manufacture of photonic components for the terahertz band. *J Appl Phys* 2020; 127(21): 210901. DOI: 10.1063/1.5140270.

#### *Authors' information*

**Yuri El'marovich Geints** (b. 1963), graduated from Tomsk State University in 1986 with a degree of “Optical devices and systems”, works as a Chief Researcher at the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Research interests: computer optics, nanophotonics, nonlinear optics of wave processes. E-mail: [ygeints@iao.ru](mailto:ygeints@iao.ru).

**Oleg Vladilenovich Minin** (b. 1960), graduated from Novosibirsk State University with a degree of “Physicist” in 1982, works as a Chief Researcher at the Siberian State University of Geosystems and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member. Metrological Academy of Russia. Author and co-author of over 300 scientific papers (including 10 monographs, including those published abroad), over 100 inventions and patents of the Russian Federation. Research interests: computer optics, nano- and mesoscale photonics, near-field optics. E-mail: [oleg.minin@ngs.ru](mailto:oleg.minin@ngs.ru).

**Igor Vladilenovich Minin** (b. 1960), graduated from Novosibirsk State University with a degree of “Physicist” in 1982, works as a Chief Researcher at the Siberian State University of Geosystems and Technologies, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member. Metrological Academy of Russia. Author and co-author of over 300 scientific papers (including 10 monographs, including those published abroad), over 100 inventions and patents of the Russian Federation. Research interests: computer optics, nano- and mesoscale photonics, near-field optics. E-mail: [prof.minin@gmail.com](mailto:prof.minin@gmail.com).

*Received May 24, 2021. The final version – July 5, 2021.*