

УДК 535.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ФОТОННОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ВНЕОСЕВОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНЫ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

А.Г. Паулиш^{1,2,3}, О.В. Минин⁴, И.В. Минин⁴

¹Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН «КТИПМ»,

²Новосибирский государственный технический университет

³Новосибирский государственный университет

⁴Сибирский государственный университет геосистем и технологий

В статье приводятся результаты экспериментальной проверки концепции ранее предложенного полностью оптического селективного по длине волны многоканального коммутатора на основе внеосевой зонной пластины Френеля в миллиметровом диапазоне длин волн без применения микромеханических устройств или нелинейных материалов. Рассмотрен лабораторный прототип такого устройства и обсуждаются его основные параметры. На основе проведенных экспериментов показано, что оптическая изоляция коммутируемых каналов для переключателя на базе внеосевой зонной пластины может достигать 15 дБ при разности частот 25 ГГц в диапазоне частот 93 – 136 ГГц.

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

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-42-50

Введение

Оптические переключатели используются в современных сетевых оптических коммуникациях [1], в частности для разделения оптических сигналов с разной частотой, распространяющихся по единому оптическому каналу. В работе [2] нами была предложена новая концепция селективного по длине волны полностью оптического переключателя на основе новых структурированных пространственно-локализованных световых пучков типа «фотонный крючок» [3, 4], относящаяся к классу селективных по длине волны переключателей [5, 6]. Особенностью этой концепции является возможность реализации немеханического и полностью оптического пространственного переключателя, который изменяет направление выходного света без использования нелинейных материалов [2].

В настоящем сообщении мы приводим результаты экспериментальной проверки концепции указанного выше переключателя оптического типа в миллиметровом (ММ) диапазоне длин волн.

1. Схема эксперимента

Для реализации функции оптического переключателя зависимость угла искривления сфокусированного излучения от длины волны облучения обеспечивается дифракционным элементом в виде зонной пластины. Поэтому при определенной пространственной конфигурации такой структуры и зон приема можно

добиться изменения уровня оптического сигнала в каждом из каналов при изменении длины волны излучения. В данном случае пространственный наклон области ближнепольной фокусировки обеспечивался использованием зонной пластины Френеля, область фокусировки которой находится вне оптической оси системы. Схема экспериментальной установки, ее основных составных частей и принцип работы показаны на рис. 1, 2. ММ излучение, генерируемое источником (1), проходит волновод (2) и с помощью антенны Кассегрена (3) формируется квазиплоская волна (5) диаметром ~ 100 мм, падающая на фазовую пластину (6). Расстояние от антенны Кассегрена до фазовой пластины d много больше рабочей апертуры антенны $D = 100$ мм, т.е. реализуются условия дальнего поля. После ФП излучение (7) фокусируется в плоскости ZX , расположенной вне оптической оси падающего излучения (5). В зависимости от частоты излучения положение фокусировки пучка сдвигается вдоль оси Z в плоскости ZX . Для измерения пространственного распределения интенсивности излучения в плоскости ZX фотоприемник (8, 9, 10) размещался в центре двухкоординатного стола с электромеханическими приводами, управляемыми от компьютера. Сканирование области фокусировки излучения фотоприемником осуществлялось по области размером 100×100 мм с шагом 0,5 мм.

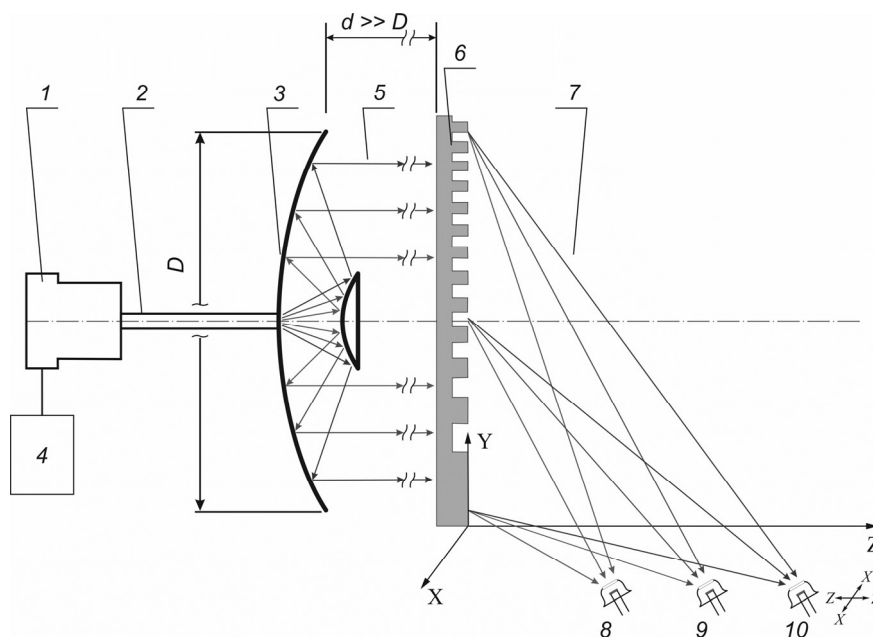


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки:

1 – ММ излучатель; 2 – волновод; 3 – антенна Кассегрена; 4 – плата управления; 5 – падающий квазипараллельный пучок ММ излучения; 6 – внеосевая фазовая пластина Френеля; 7 – пучок после фазовой пластины; 8–10 – положения фотодетектора при различных длинах волн излучения

Fig. 1 – Experimental setup scheme:

1 – MM emitter; 2 – waveguide; 3 – Cassegrain antenna; 4 – control unit; 5 – incident quasi-parallel MM radiation beam; 6 – Fresnel off-axis phase plate; 7 – the beam after the phase plate; 8–10 – photodetector positions at different radiation wavelengths

В качестве источника излучения (рис. 2, а) использовались излучающие модули ММ диапазона (производства АО «НИИПП», г. Томск) монолитной конструк-

пии на основе диодов Ганна с рабочими частотами 93, 118 и 136 ГГц (диапазон перестройки $\pm 0,75$ ГГц) и выходной мощностью 3,1 и 0,2 мВт соответственно. ММ модули снабжены волноводом, оканчивающимся антенной Кассегрена с рабочей апертурой $D = 100$ мм. Антенна обеспечивала квазиплоский волновой фронт с расходимостью пучка излучения менее одного градуса.

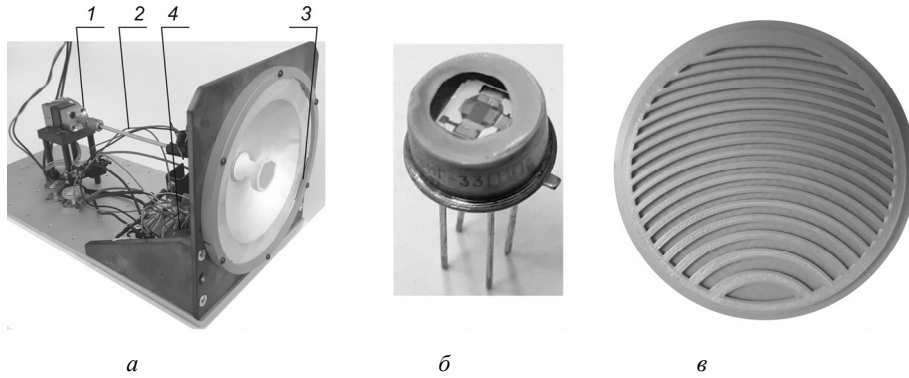


Рис. 2 – Внешний вид источника излучения (а), состоящего из ММ излучателя (1), волновода (2), антенны Кассегрена (3) и платы управления (4); внешний вид пироэлектрического фотоприёмника ММ диапазона (б); внешний вид фазовой пластины Френеля (в)

Fig. 2 – Overview of the radiation source (a), consisting of an MM emitter (1), waveguide (2), Cassegrain antenna (3) and a control unit (4); pyroelectric photodetector (b); off-axis Fresnel (c)

В качестве детектора ММ излучения использовался пироэлектрический фотоприемник на основе тетрааминодифенила с расширенным диапазоном спектральной чувствительности (0,4–3000 мкм) производства НПО «ВОСТОК», г. Новосибирск, внешний вид которого показан на рис. 2, б. Фотоприемник имеет входное окно из полиэтилентерефталата (лавсан) диаметром 5 мм и фоточувствительную площадку размером 1×1 мм². Характеристики использованного пироэлектрического фотоприемника подробно исследованы в работах [7, 8]. Для получения максимального сигнала с пироприемника осуществлялось модулирование излучения с частотой около 100 Гц при помощи механического обтюратора.

В качестве оптического элемента переключателя была использована асимметричная фотонная структура в виде внеосевой бинарной фазовой пластины (ФП) Френеля [9, 10], представленная на рис. 2, в. ФП диаметром 120 мм изготавливалась методом 3D печати [11] на принтере Chear3d V300 с областью печати $300 \times 300 \times 300$ мм, точностью 50 мкм. Применяемый материал – ABS пластик REC пруток диаметром 1,75 мм. Коэффициент преломления материала по литературным данным составлял $n \approx 1,59$ [12] и мог корректироваться выбором плотности 3D печати [13]. Заметим, что при таких геометрических параметрах мезоразмерной ФП параметр размера Ми структуры составлял величину $q = \pi D / \lambda = 31\pi$ (D – диаметр ФП), что соответствует условию существования эффекта фотонной струи [14] на границе с пределом геометрической оптики.

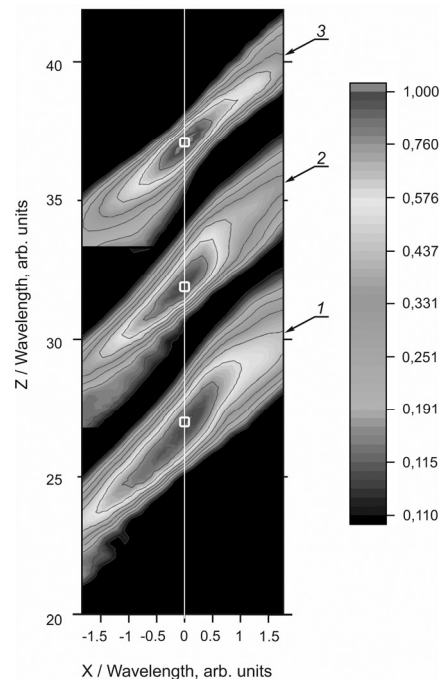
2. Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов представлены на рис. 3, 4. На рис. 3 показано двумерное распределение интенсивности плоской волны при дифракции на ФП излучения с частотами 93 (1), 118 (2) и 136 (3) ГГц. Рисунок является синтезом про-

пространственных распределений интенсивности ММ излучения, полученных для каждой частоты в отдельности. Из рисунка видно, что при распространении сфокусированного ФП излучения, вследствие дифракции, пространственный размер области фокусировки, как и ожидалось, меняется, что следует из рис. 3, 4 и таблицы. Также при изменении длины волны излучения область локализации излучения (внеосевого фокуса [9, 10]) изменяет свое пространственное положение. Размещение оптических приемников вдоль оси Z при $X=0$ обеспечивает различную амплитуду поля в каждом из каналов при работе на различной частоте, 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 ФП и диапазона длин волн облучения. Разность сигналов на соседних приемниках излучения $dS = S_1 - S_2$ служит мерой оптической изоляции (развязки) каналов коммутации. Отметим, что для улучшения оптической развязки переключаемых каналов мы выбрали фотоприемник с входной апертурой заметно меньше размера поперечного сечения области локализации излучения (рис. 4).

Рис. 3 – Распределение интенсивности сигнала в плоскости ZX для частот 93 (1), 118 (2) и 136 (3) ГГц соответственно. Координаты по X и Z нормированы на длину волны излучения. Квадратами показан размер фоточувствительной площадки пироприемника в масштабе рисунка

Fig. 3 – Signal intensity distribution in the ZX plane for frequencies 93 (1), 118 (2) and 136 (3) GHz, respectively. The X and Z coordinates are normalized to the radiation wavelength. The squares show the photosensitive area size of the pyrodetector on the figure scale



На рис. 4 показано распределение интенсивности преломленного излучения вдоль оси Z при координате $X=0$ для разных частот излучения. Интенсивность излучения нормирована на максимум, полученный для каждой частоты в отдельности. Значение координаты по Z нормировано на длину волны излучения. На вставке квадратом показан размер фоточувствительной площадки пироэлектрического фотоприемника в соответствующих координатах. В табл. 1 приведены результаты обработки полученных зависимостей. Из рис. 4 видно, что сигнал с соседней частотой 118 ГГц на координате максимума сигнала, соответствующего частоте 93 ГГц, более чем в 15 раз меньше, чем сигнал с частотой 93 ГГц. То есть измеренное взаимное влияние сигналов на соседних частотах составило менее 15 дБ.

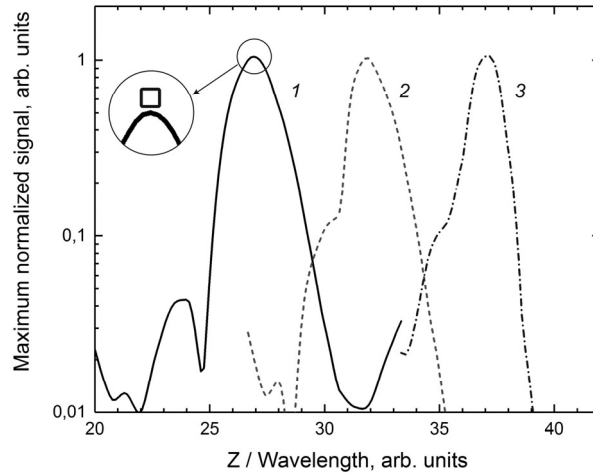


Рис. 4 – Зависимости интенсивности сигналов вдоль оптической оси Z , показанной на рис. 3 светлой сплошной линией, для частот 93, 118 и 136 ГГц. Интенсивности нормированы на максимум, полученный для каждой частоты отдельно. Координата по Z нормирована на длину волны излучения. На выноске в масштабе показан размер фоточувствительной площадки пироприемника для сравнения

Fig. 4 – Signal intensity dependences along the optical Z axis, shown in fig. 3 by a light solid line, for frequencies of 93, 118 and 136 GHz. The intensities are normalized to the maximum for each frequency. The Z coordinate is normalized to the radiation wavelength. The size of the pyrodetector photosensitive area is shown in inset for comparison

Ширина распределения интенсивности поля вдоль оси Z на полувысоте
The full width at half height for field intensity distribution along the Z axis

Частота, ГГц	Длина волны, мм	Положение максимума Z / λ , отн. ед.	Ширина на полувысоте $\Delta Z / \lambda$, отн. ед.	Относительная ширина на полувысоте $\Delta Z / Z$, %
93	3,23	26,9	2,29	8,5
118	2,54	31,8	1,86	5,8
136	2,21	37,1	1,56	4,2

Как видно, оптическая изоляция dS может достигать более 15 дБ, что при условии фактически мгновенной скорости срабатывания переключателя (например, для фотоприемников на основе диодов Шоттки ZBD-F производства Virginia Diodes время «реакции» составляет $\sim 3 \cdot 10^{-11}$ с [15]) является хорошим показателем. При этом спектральный диапазон, в котором реализуется переключение состояний, в данном случае составляет около 43 ГГц или примерно 38 % от средней длины волны.

3. Заключение

Таким образом, в данной работе экспериментально продемонстрирована принципиальная возможность создания многоканального (в данном случае трехканального) коммутатора оптического типа на основе диэлектрической мезораз-

мерной структуры с нарушенной симметрией геометрической формы, выполненной в виде внеосевой ФП Френеля. Благодаря уникальному свойству такой структуры изменять пространственное положение дифракционно ограниченной области фокусировки в зависимости от длины волны облучения, данный переключатель является хорошим кандидатом для реализации электронной оптической коммутации в современной оптоэлектронике, не требующего управлением электрическим сигналом. Заметим, что проведение «полномасштабной» оптимизации характеристик оптического переключателя в данной работе не предполагалось, а экспериментально демонстрировалась лишь соответствующая концепция. Более того, учитывая масштабируемость уравнений Максвелла, результаты данной работы могут быть перенесены в другие диапазоны электромагнитного излучения, в частности оптический или ИК.

ЛИТЕРАТУРА

1. **El-Bawab T.S.** Optical switching. – Boston, MA: Springer, 2006. – 474 p.
2. **Geints Yu.E., Minin O.V., Minin I.V.** Concept of a miniature photonic spatial switch based on off-axis zone // *Quantum Electronics*. – 2021. – Vol. 51 (8). – P. 727–729. – DOI: 10.1070/QEL17600.
3. **Dholakia K., Bruce G.D.** Optical hooks // *Nature Photonics*. – 2019. – Vol. 13. – P. 229–230.
4. **Christodoulides D.N.** Foreword // Minin O.V., Minin I.V. *The Photonic Hook*. – Cham: Springer, 2021. – P. vii–viii. – DOI: 10.1007/978-3-030-66945-4.
5. 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 (10). – P. 100803. – DOI: 10.1063/1.5120063.
6. Wavelength-selective 2×2 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. Panepucci, D. Dai // *Photonics Research*. – 2020. – Vol. 8 (7). – P. 1171–1176.
7. Characterization of tetraaminodiphenyl-based pyroelectric detector from visible to millimeter wave ranges / A.G. Paulish, A.V. Gusachenko, A.O. Morozov, K.V. Dorozhkin, V.I. Suslyaev, V.A. Golyashov, O.V. Minin, I.V. Minin // *Optical Engineering*. – 2020. – Vol. 59 (6). – P. 061612.
8. Sensitivity of the tetraaminodiphenyl based pyroelectric sensor from visible to sub-THz range / A.G. Paulish, A.V. Gusachenko, A.O. Morozov, V.A. Golyashov, K.V. Dorozhkin, V.I. Suslyaev // *Sensor Review*. – 2020. – Vol. 40 (3). – P. 291–296.
9. **Guo Y.J., Barton S.K.** Offset Fresnel zone plate antennas // *International Journal of Satellite Communications*. – 1994. – Vol. 12 (4). – P. 381–385.
10. **Minin I.V., Minin O.V., Golodnikov D.O.** Simple free-space method for measurement of dielectric constant by means of diffractive optics with new capabilities // 2006 8th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. – Novosibirsk, Russia, 2006. – P. 13–18. – DOI: 10.1109/APEIE.2006.4292375.
11. **Monkevich J.M., Le Sage G.P.** Design and fabrication of a custom-dielectric Fresnel multi-zone plate lens antenna using additive manufacturing techniques // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 61452–61460. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2916077.
12. 3D printed diffractive terahertz lenses / W.D. Furlan, V. Ferrando, J.A. Monsoriu, P. Zagrajek, E. Czerwińska, M. Szustakowski // *Optics Letter*. – 2016. – Vol. 41 (8). – P. 1748–1751. – DOI: 10.1364/OL.41.001748.
13. **Poyanco J.M., Pizarro F., Rajo-Iglesias E.** Cost-effective wideband dielectric planar lens antenna for millimeter wave applications // *Science Reports*. – 2022. – Vol. 12. – P. 4204. – DOI: 10.1038/s41598-022-07911-z.
14. **Minin I.V., Minin O.V., Geints Y.E.** Localized EM and photon jets from non-spherical and non-symmetric dielectric mesoscale objects: Brief review // *Annalen der Physik*. – Berlin, 2015. – Vol. 527 (7–8). – P. 491–497. – DOI: 10.1002/andp.201500132.
15. Fast Detectors (ZBD-F). – URL: <https://radiodes.com/en/zbd> (accessed: 13.09.2022).

EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE CONCEPT OF THE PHOTON SPATIAL SWITCH BASED ON OFF-AXIS ZONE PLATE IN THE MILLIMETER RANGE

Paulish A.G.^{1,2,3}, Minin O.V.⁴, Minin I.V.²

¹*Novosibirsk Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics "TDIAM",
Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

³*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

⁴*State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia*

The results of an experimental verification of the concept of the previously proposed all-optical wavelength-selective multichannel switch based on an off-axis Fresnel zone plate in the millimeter wavelength range without the use of micromechanical devices or non-linear materials are presented. A laboratory prototype of such a device is considered and its main parameters are discussed. It is shown that the optical isolation of switched channels for a switch based on an off-axis zone plate can reach 15 dB at a frequency difference of 25 GHz in the frequency range of 93–136 GHz.

Keywords: optical switch, photon hook, Fresnel zone plate.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-42-50

REFERENCES

1. El-Bawab T.S. *Optical Switching*. Boston, MA, Springer, 2006. 474 p.
2. Geints Yu.E., Minin O.V., Minin I.V. Concept of a miniature photonic spatial switch based on off-axis zone. *Quantum Electronics*, 2021, vol. 51 (8), pp. 727–729. DOI: 10.1070/QEL17600.
3. Dholakia K., Bruce G.D. Optical hooks. *Nature Photonics*, 2019, vol. 13, pp. 229–230.
4. Christodoulides D.N. Foreword. Minin O.V., Minin I.V. *The Photonic Hook*. Cham, Springer, 2021, pp. vii–viii. DOI: 10.1007/978-3-030-66945-4.
5. Seok T.J., Luo J., Huang Z., Kwon K., Henriksson J., Jacobs J., Ochikubo L., Muller R.S., Wu M.C. Silicon photonic wavelength cross-connect with Integrated MEMS Switching. *APL Photonics*, 2019, vol. 4 (10), p. 100803. DOI: 10.1063/1.5120063.
6. Zhang C., Zhang M., Xie Y., Shi Y., Kumar R., Panepucci R., Dai D. Wavelength-selective 2×2 optical switch based on a $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ -assisted microring. *Photonics Research*, 2020, vol. 8 (7), pp. 1171–1176.
7. Paulish A.G., Gusachenko A.V., Morozov A.O., Dorozhkin K.V., Suslyayev V.I., Golyashov V.A., Minin O.V., Minin I.V. Characterization of tetraaminodiphenyl-based pyroelectric detector from visible to millimeter wave ranges. *Optical Engineering*, 2020, vol. 59 (6), p. 061612.
8. Paulish A.G., Gusachenko A.V., Morozov A.O., Golyashov V.A., Dorozhkin K.V., Suslyayev V.I. Sensitivity of the tetraaminodiphenyl based pyroelectric sensor from visible to sub-THz range. *Sensor Review*, 2020, vol. 40 (3), pp. 291–296.
9. Guo Y.J., Barton S.K. Offset Fresnel zone plate antennas. *International Journal of Satellite Communications*, 1994, vol. 12 (4), pp. 381–385.
10. Minin I.V., Minin O.V., Golodnikov D.O. Simple free-space method for measurement of dielectric constant by means of diffractive optics with new capabilities. *2006 8th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering*, Novosibirsk, Russia, 2006, pp. 13–18. DOI: 10.1109/APEIE.2006.4292375.
11. Monkevich J.M., Le Sage G.P. Design and fabrication of a custom-dielectric Fresnel multi-zone plate lens antenna using additive manufacturing techniques. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 61452–61460. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2916077.
12. Furlan W.D., Ferrando V., Monsoriu J.A., Zagrajek P., Czerwińska E., Szustakowski M. 3D printed diffractive terahertz lenses. *Optics Letter*, 2016, vol. 41 (8), pp. 1748–1751. DOI: 10.1364/OL.41.001748.

13. Poyanco J.M., Pizarro F., Rajo-Iglesias E. Cost-effective wideband dielectric planar lens antenna for millimeter wave applications. *Science Reports*, 2022, vol. 12, p. 4204. DOI: 10.1038/s41598-022-07911-z.
14. Minin I.V., Minin O.V., Geints Y.E. Localized EM and photon jets from non-spherical and non-symmetric dielectric mesoscale objects: Brief review. *Annalen der Physik*, Berlin, 2015, vol. 527 (7–8), pp. 491–497. DOI: 10.1002/andp.201500132.
15. Fast Detectors (ZBD-F). Available at: <https://vadiodes.com/en/zbd> (13.09.2022).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Паулиш Андрей Георгиевич – родился в 1963 году, в 1985 году окончил Новосибирский государственный университет по специальности «физик», работает ученым секретарем Филиала Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИПМ», д-р техн. наук, доцент. Автор и соавтор более 150 научных трудов (в том числе двух монографий, изданных за рубежом), более 20 изобретений и патентов РФ и международных патентов. Область научных интересов: физика полупроводников, спектроскопия, оптико-электронные системы и приборы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: paulish63@ngs.ru).

Paulish Andrey Georgievich (b. 1963), graduated from Novosibirsk State University with a degree of “Physicist” in 1985, Currently working at the Novosibirsk Branch of Rzhannov Institute of Semiconductor Physics, SBRAS, “Technology and Design Institute of Applied Microelectronics” as Scientific Secretary, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. Author and co-author of over 150 scientific papers (including 2 monographs published abroad), over 20 inventions and patents of the Russian Federation and international patents. Research interests: semiconductor physics, spectroscopy, optoelectronics systems and devices. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: paulish63@ngs.ru).

Минин Олег Владиленович – родился в 1960 году, 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. (Адрес: 630010, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10. E-mail: oleg.minin@ngs.ru).

Minin Oleg Vladilenovich (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. (Address: 10, Plahotnogo St., Novosibirsk, 630010, Russia. E-mail: 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. (Адрес: 630010, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10. E-mail: prof.minin@gmail.com).

Minin Igor Vladilenovich (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. (Address: 10, Plahotnogo St., Novosibirsk, 630010, Russia. E-mail: prof.minin@gmail.com).

*Статья поступила 12 августа 2022 г.
Received August 12, 2022*

To Reference:

Paulish A.G., Minin O.V., Minin I.V. Eksperimental'noe podtverzhdenie kontseptsii fotonnogo prostranstvenno-go pereklyuchatelya na osnove vneosevoi zonnol plastiny v millimetrovom diapazone [Experimental confirmation of the concept of the photon spatial switch based on off-axis zone plate in the millimeter range]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 3 (56), pp. 42–50. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-42-50.