

## Управление поперечно-модовой и поляризационной структурой терагерцовых когерентных пучков

В.С. Павельев<sup>1,2</sup>, Ю.Ю. Чопорова<sup>2,3,4</sup>, Н.Д. Осинцева<sup>3,4</sup>, К.Н. Тукмаков<sup>1,2</sup>, Б.А. Князев<sup>2,3,4</sup>  
<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,  
<sup>2</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,  
<sup>3</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск,  
<sup>4</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия Новосибирск

### Аннотация

Исследована возможность формирования многомодовых когерентных пучков терагерцового диапазона с заданным поперечно-модовым составом, а также терагерцовых векторно-поляризованных пучков с помощью комбинаций элементов кремниевой дифракционной оптики, формирующих одномодовые пучки из освещающего пучка терагерцового лазера на свободных электронах.

**Ключевые слова:** дифракционный оптический элемент, лазер на свободных электронах, терагерцовое излучение, моды Гаусса–Эрмита.

**Цитирование:** Павельев, В.С. Управление поперечно-модовой и поляризационной структурой терагерцовых когерентных пучков / В.С. Павельев, Ю.Ю. Чопорова, Н.Д. Осинцева, К.Н. Тукмаков, Б.А. Князев // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 1103-1108. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1103-1108.

### Введение

Актуальность задачи управления поперечно-модовой структурой и поляризационным состоянием когерентных пучков терагерцового излучения обусловлена появлением и широким применением источников когерентного излучения (в том числе мощного) терагерцового диапазона – лазеров на свободных электронах [1] и гиротронов [2]. Перспективы применения излучения этого диапазона в системах связи [3] и лидарных системах [4] объясняют интерес к возможности формирования пучков с поперечной структурой, обеспечивающей наибольшую устойчивость к распространению в дисперсионных средах [5]. Появление лазеров на свободных электронах открыло возможность получения когерентных пучков на заданной длине волны [1]. Таким образом, обладая возможностью создания элементов для формирования пучков с заданной поперечной структурой и используя возможности лазера на свободных электронах, можно получать эталонные пучки когерентного излучения заданного модового состава с заданной длиной волны. В работе [6] приведены результаты применения волноводных устройств для управления поперечно-модовым составом пучков гиротронного излучения терагерцового диапазона. Недостатками таких устройств являются габаритные характеристики, а также относительная сложность технологического исполнения. В работах [5, 7, 8] приведены результаты исследования бинарных (двухуровневых) кремниевых дифракционных оптических элементов (ДОЭ), предназначенных для формирования одномодовых пучков терагерцового диапазона из освещающего пучка лазера на свободных электронах. Ранее ДОЭ оптического диапазона, согласованные с поперечными модами лазерного излучения, были предложены в [9].

Технология изготовления кремниевых элементов, использованная в [5, 7, 8], не отличалась от технологии, использованной в [10, 11] для изготовления кремниевых фокусирующих элементов. В настоящей работе приведены результаты экспериментов по формированию когерентных многомодовых пучков терагерцового диапазона с заданным поперечно-модовым составом и терагерцовых векторно-поляризованных пучков с помощью элементов кремниевой дифракционной оптики, рассмотренных в [5, 7, 8]. Ранее, в работах [12–15], были исследованы ДОЭ, предназначенные для формирования мод лазерного излучения видимого и инфракрасного диапазонов – моданы. В работе [16] было показано, что фазовая ступенька, аппроксимирующая фазовое распределение в сечении моды TEM<sub>01</sub> (или TEM<sub>10</sub>), позволяет также управлять поляризацией [16]. Показано [13, 17], что методы дифракционной оптики позволяют формировать пучки когерентного излучения практически произвольного поперечно-модового состава, в том числе многомодовые пучки с ОУМ (орбитальным угловым моментом) [17]. Создание дифракционных оптических элементов, формирующих пучки лазерного излучения заданного модового состава видимого и инфракрасного диапазонов, позволило решить ряд фундаментальных и прикладных задач [12–17].

### 1. Формирование терагерцовых векторно-поляризованных пучков

Терагерцовые пучки с радиальной поляризацией были получены для широкополосных источников, например, с помощью фотопроводящих антенн [18, 19] с помощью круглого металлического волновода для селекции мод и фазовой пластины [20, 21]. В настоящей работе был использован метод, предложенный в [22] – синтезировать пучки с цилиндрической по-

ляризацией с помощью сложения Гауссовых мод TEM<sub>01</sub> и TEM<sub>10</sub> (рис. 1). Сложение пучков с заданной фазовой составляющей и поляризацией позволяет формировать векторные пучки, в том числе азимутально (рис. 1а) и радиально (рис. 1в) поляризованные.

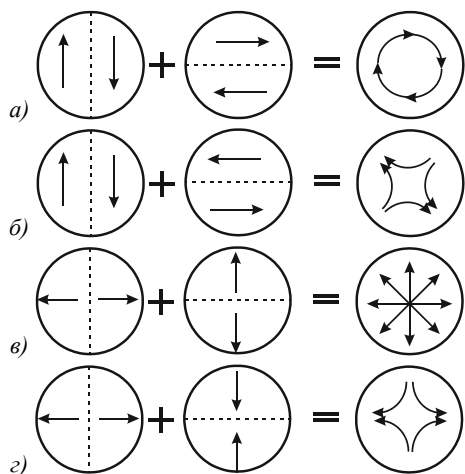


Рис. 1. Принцип формирования векторно-поляризованных пучков Гаусса-Лагерра с помощью сложения поляризованных пучков Гаусса-Эрмита

В [23] для сложения одномодовых пучков видимого диапазона с целью получения цилиндрически поляризованного пучка применялась оптическая схема, основанная на использовании дифракционной решётки.

В данной работе для формирования терагерцовых векторно-поляризованных пучков был использован интерферометрический способ, схема интерферометра Маха-Цандера показана на рис. 2. В плечах интерферометра были установлены элементы, формирующие пучки Гаусса-Эрмита [7], в случае пучков с орбитальным угловым моментом – элементы, формирующие Бесселеву моду с орбитальным угловым моментом (ОУМ) [5]. В качестве источника терагерцового излучения был использован Новосибирский лазер на свободных электронах – источник, генерирующий непрерывное монохроматическое перестраиваемое по длине волны излучение в диапазоне 5–240 мкм [1]. Поперечное распределение интенсивности соответствует Гауссовому и поляризация линейна. Эксперименты, результаты которых приведены на рис. 3, проведены на длине волны освещающего пучка  $\lambda = 141$  мкм. Матричный микроболометрический приёмник  $320 \times 240$  элементов ( $16 \times 12$  мм) был использован для регистрации интенсивности [24].

На рис. 3 показано экспериментальное распределение интенсивности пучков в обоих плечах интерферометра (рис. 3а, в) при скрещенных поляризациях и суммарное распределение интенсивности на выходе интерферометра (рис. 3г). На рис. 3б приведена интерферограмма пучка Гаусса-Эрмита (1,0) с исходным Гауссовым пучком. Для получения интерферограммы в нужном плече интерферометра ДОЭ и поляризатор удалялись. Относительные интенсивности пучков Гаусса-Эрмита выравнились. Неравномерность интенсивности пучка Гаусса-Лагерра объясняется спек-

тральной шириной линии излучения, разной интенсивностью в плечах и наличием поляризационной чувствительности у матрицы микроболометров [24].

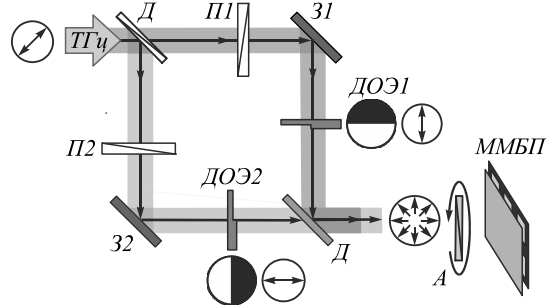


Рис. 2. Схема эксперимента. Интерферометр Маха-Цандера. Д – плёночные полипропиленовые светоделители; 31, 32 – плоские алюминиевые зеркала; П1, П2 – ортогонально-ориентированные поляризаторы в соответствующих плечах интерферометра; ДОЭ1, ДОЭ2 – дифракционные оптические элементы, формирующие моды ЭГ, фазовые маски показаны справа (чёрный цвет – сдвиг фаз 0, белый –  $\pi$ ). Детектор ММБП – матричный микроболометрический приёмник

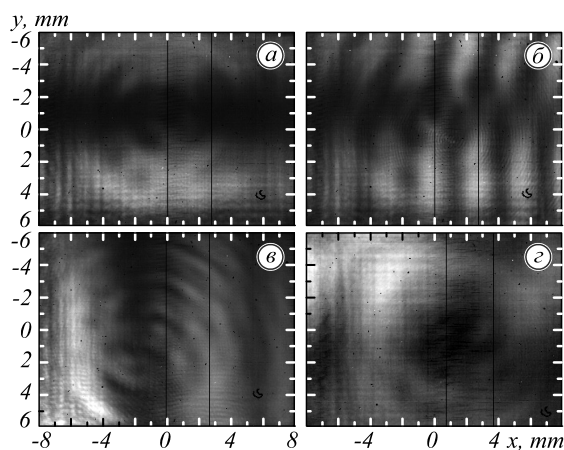


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования формирования векторных пучков (экспонированные области показаны белым): распределение интенсивности пучка на выходе с анализатором, расположенным вертикально (а); результат интерференции пучка Гаусса-Эрмита (1,0) с исходным Гауссовым пучком (б), пучка на выходе с анализатором, расположенным горизонтально (в), распределение интенсивности пучка радиально-поляризованного пучка без анализатора (г)

Отметим, что для управления поляризационным состоянием пучка могут быть использованы высокоапертурные аксиконы (аксиконы с субволновым микрорельефом). В [25–28] приведены результаты моделирования высокоапертурного аксикона видимого диапазона.

## 2. Формирование вращающихся пучков с заданным модовым составом

В данной работе для формирования многомодовых пучков с ОУМ с заданным модовым составом, так же как в случае с модами Гаусса-Эрмита (рис. 2), использовалась схема интерферометра Маха-Цандера (рис. 2), но без поляризаторов в обоих плечах. Таким

образом, поляризация на входе и выходе интерферометра сохранялась и была линейная (примерно 45°). Фазовые функции ДОЭ, предназначенных для формирования одномодовых пучков с ОУМ и распределения интенсивности вращающихся пучков с топологическими зарядами  $l = +1, +2$ , приведены на рис. 4.

На рис. 5 показано моделирование и экспериментальные данные по формированию многомодовых пучков. Как было показано в [29], если амплитуды двух коаксиальных вращающихся пучков равны, а топологический заряд противоположен, то общий ОУМ результирующего поля пропадает (рис. 5). В то же время за счёт изменения амплитуд складываемых пучков результирующий момент может быть изменён, но его пространственное распределение остаётся враща-

тельно-симметричным. Тогда полный момент может быть оценен по формуле [30]:

$$\frac{\langle L_z \rangle}{P} = -\frac{2\omega l (Q^2 - 1)}{c^2 (Q^2 + 1)}, \tag{1}$$

где  $\langle L_z \rangle$  – результирующий суммарный момент,  $P$  – результирующая мощность,  $l$  – топологический заряд,  $Q$  – отношение амплитуд интерферирующих полей. Таким образом, результирующий момент двух вращающихся пучков равной амплитуды изменяется в пределах

$$\frac{\langle L_z \rangle}{P} \in \left( -\frac{2\omega l}{c^2}, \frac{2\omega l}{c^2} \right).$$

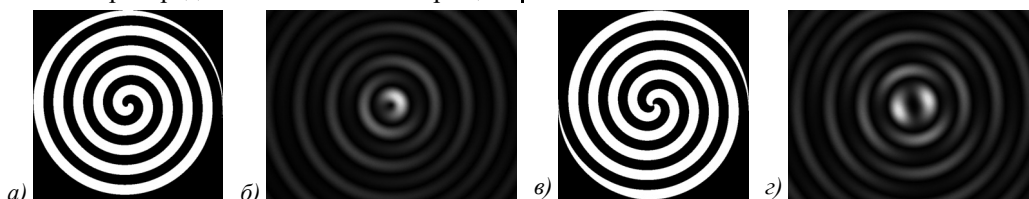


Рис. 4. Фазовые функции ДОЭ (чёрный цвет соответствует значению фазы 0, белый –  $\pi$ ) (а, в), распределения интенсивности и фазы формируемых вращающихся пучков (б, з) с топологическими зарядами  $l = +1, +2$ . Фаза  $0-\pi$  показана оттенками серого

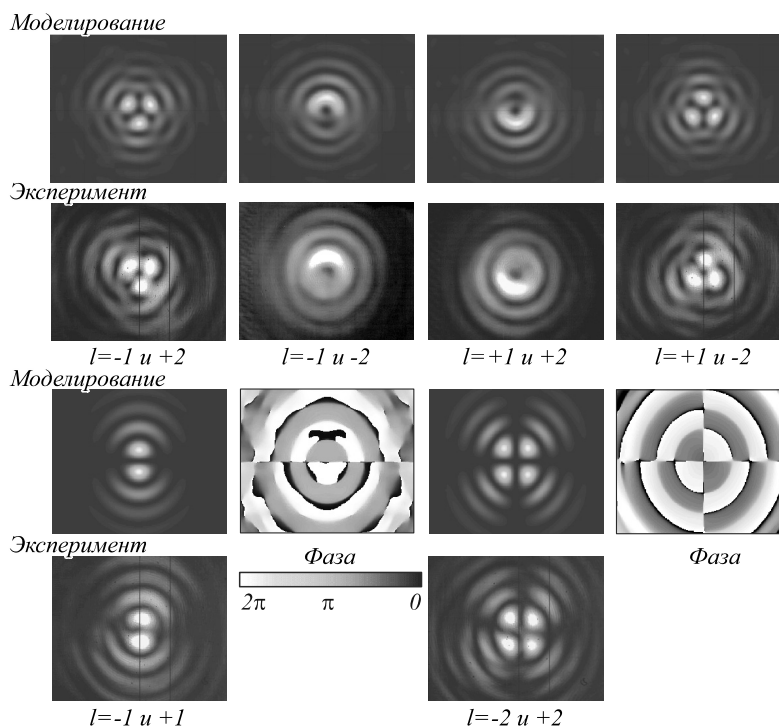


Рис. 5. Распределения интенсивности многомодовых пучков с ОУМ. Верхний ряд – результаты моделирования, нижний – эксперимент. Распределение фазы демонстрирует отсутствие ОУМ в многомодовых пучках одинаковой величины ОУМ и интенсивности, но разного знака

Можно отметить хорошее соответствие результатов компьютерного моделирования и экспериментальных результатов, приведённых на рис. 5.

**Заключение**

Приведены результаты экспериментов по формированию многомодовых когерентных пучков терагерцового диапазона с заданным поперечно-модовым

составом, а также терагерцовых векторно-поляризованных пучков с помощью комбинаций элементов кремниевой дифракционной оптики, формирующих одномодовые пучки из освещающего пучка терагерцового лазера на свободных электронах.

Разработка методов управления поперечно-модовой и поляризационной структурой пучков терагерцового диапазона позволит эффективно решать при-

кладные задачи, связанные с распространением пучков терагерцового диапазона в неоднородных средах, а также с возбуждением плазмонных волноводов.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (грант № 19-72-20202) в части постановки эксперимента по формированию многомодовых пучков, состоящих из мод с одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку топологическими зарядами, и при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) в части экспериментального исследования структуры векторных пучков. Эксперимент выполнен в ИЯФ СО РАН с использованием оборудования ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Новосибирский ЛСЭ».

### Литература

1. **Kulipanov, G.N.** Novosibirsk free electron laser-facility description and recent experiments / G.N. Kulipanov, [et al.] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2015. – Vol. 5, Issue 5. – P. 798-809.
2. **Glyavin, M.Yu.** Development and applications of THz gyrotrons / M.Yu. Glyavin // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 149. – 01008.
3. **Bubnov, G.M.** Data rates of SubTHz wireless telecommunication channels / G.M. Bubnov, I.V. Lesnov, V.F. Vdovin // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 149. – 02012.
4. **Кулипанов, Г.Н.** Экспериментальные исследования взаимодействия терагерцового излучения новосибирского лазера на свободных электронах с водным аэрозолем / Г.Н. Кулипанов, А.А. Лисенко, Г.Г. Матвиенко, В.К. Опшалаков, В.В. Кубарев, Е.Н. Чесноков, С.В. Бабченко // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 12. – С. 1070-1073.
5. **Choporova, Yu.Yu.** High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range / Yu.Yu. Choporova, B.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, V.S. Pavelyev, M.A. Scheglov, N.A. Vinokurov, B.O. Volodkin, V.N. Zhabin // Physical Review A. – 2017. – Vol. 96, Issue 2. – 023846. – DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023846.
6. **Sobolev, D.I.** Polarization-dependent TE<sub>11</sub>-to-TE<sub>11</sub>/TE<sub>01</sub> waveguide mode converter for transmission line mode switching / D.I. Sobolev, G.G. Denisov, A.G. Eremeev, V.V. Holoptsev, A.I. Tsvetkov // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 149. – 04017.
7. **Агафонов, А.Н.** Управление поперечно-модовым составом терагерцового лазерного излучения с помощью элементов бинарной кремниевой оптики / А.Н. Агафонов, Б.О. Володкин, А.К. Кавеев, Б.А. Князев, Г.И. Кропотов, В.С. Павельев, К.Н. Тукмаков, Ю.Ю. Чопорова // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 763-769.
8. **Pavelyev, V.S.** Terahertz optical elements for control of high-power laser irradiation / V.S. Pavelyev, A.N. Agafonov, B.O. Volodkin, K.N. Tukmakov, B.A. Knyazev, Yu.Yu. Choporova // EPJ Web of Conferences. – 2018. – Vol. 195. – 07006.
9. **Golub, M.A.** An experimental-study into the power distribution over transverse-modes in a fiber-optic waveguide with the use of spatial filters / M.A. Golub, S.V. Karpeev, S.G. Krivoshlykov, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Kvantovaya Elektronika. – 1984. – Vol. 11, Issue 9. – P. 1869-1871.
10. **Агафонов, А.Н.** Кремниевая оптика для фокусировки лазерного излучения терагерцового диапазона в заданные двумерные области / А.Н. Агафонов, Б.О. Володкин, С.Г. Волоотовский, А.К. Кавеев, Б.А. Князев, Г.И. Кропотов, В.С. Павельев, К.Н. Тукмаков, Е.В. Цыганкова, Д.И. Цыпишка, Ю.Ю. Чопорова // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 464-470.
11. **Agafonov, A.N.** Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation / A.N. Agafonov, B.O. Volodkin, A.K. Kaveev, B.A. Knyazev, G.I. Kropotov, V.S. Pavel'ev, V.A. Soifer, K.N. Tukmakov, E.V. Tsygankova, Yu.Yu. Choporova // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2013. – Vol. 49, Issue 2. – Vol. 189-195. – DOI: 10.3103/S875669901302012X.
12. **Golub, M.A.** Spatial filter investigation of the distribution of power between transverse modes in a fiber waveguide / M.A. Golub, S.V. Karpeev, S.G. Krivoshlykov, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Soviet Journal of Quantum Electronics. – 1984. – Vol. 14, Issue 9. – P. 1255-1256. – DOI: 10.1070/QE1984v014n09ABEH006201.
13. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с. – ISBN: 5-9221-0845-4.
14. **Golub, M.A.** Spatial phase filters matched to transverse modes / M.A. Golub, S.V. Karpeev, N.L. Kazanskiy, A.V. Mirzov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer, G.V. Uvarov // Soviet Journal of Quantum Electronics. – 1988. – Vol. 18, No. 3. – P. 392-393. – DOI: 10.1070/QE1988v018n03ABEH011528.
15. Laser beam mode selection by computer generated holograms / V.A. Soifer, M.A. Golub. – CRC Press, 1994. – 215 с. – ISBN: 0-8493-2476-9.
16. **Alferov, S.V.** Study of polarization properties of fiber-optics probes with use of a binary phase plate / S.V. Alferov, S.N. Khonina, S.V. Karpeev // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31, Issue 4. – P. 802-807. – DOI: 10.1364/JOSAA.31.000802.
17. **Khonina, S.N.** Generation of rotating Gauss-Laguerre modes with binary-phase diffractive optics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M. Honkanen, J. Lautanen, J. Turunen // Journal of Modern Optics. – 1999. – Vol. 46, Issue 2. – P. 227-238. – DOI: 10.1080/09500349908231267.
18. **Winnerl, S.** Terahertz Bessel-Gauss beams of radial and azimuthal polarization from microstructured photoconductive antennas / S. Winnerl, [et al.] // Optics Express. – 2009. – Vol. 17, Issue 3. – P. 1571-1576.
19. **Kan, K.** Radially polarized terahertz waves from a photoconductive antenna with microstructures / K. Kan, [et al.] // Applied Physics Letters. – 2013. – Vol. 102, Issue 22. – 221118.
20. **Deibel, J.A.** Photoconductive terahertz antenna with radial symmetry / J.A. Deibel, M.D. Escarra, D.M. Mittleman // 2005 Quantum Electronics and Laser Science Conference. – 2005. – Vol. 2. – P. 1239-1241.
21. **Grosjean, T.** Linear to radial polarization conversion in the THz domain using a passive system / T. Grosjean, [et al.] // Optics Express. – 2008. – Vol. 16, Issue 23. – P. 18895-18909.
22. Solid-state laser engineering / W. Koehchner. – New York: Springer-Verlag, 1988.
23. **Khonina, S.N.** Grating-based optical scheme for the universal generation of inhomogeneously polarized laser beams / S.N. Khonina, S.V. Karpeev // Applied Optics. – 2010. – Vol. 49, Issue 10. – P. 1734-1738. – DOI: 10.1364/AO.49.001734.

24. **Knyazev, B.A.** Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: comparative description of imaging techniques with examples of application / B.A. Knyazev, [et al.] // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2011. – Vol. 32. – P. 1207-1222.
25. **Khonina, S.N.** High-aperture binary axicons for the formation of the longitudinal electric field component on the optical axis for linear and circular polarizations of the illuminating beam / S.N. Khonina, D.A. Savel'yev // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2013. – Vol. 117, Issue 4. – P. 623-630. – DOI: 10.1134/S1063776113120157.
26. **Degtyarev, S.A.** Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon / S.A. Degtyarev, A.P. Porfirev, S.N. Khonina // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, Issue 12. – P. B44-B48. – DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
27. **Khonina, S.N.** 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // *Applied Physics B*. – 2018. – Vol. 124, Issue 9. – 191 (13 p.). – DOI: 10.1007/s00340-018-7060-4.
28. **Kotlyar, V.V.** Two-petal laser beam near a binary spiral axicon with topological charge 2 / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, S. Schulz, L. O'Faolain // *Optics & Laser Technology*. – 2019. – Vol. 119. – 105649. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105649.
29. **Bouchal, Z.** Orbital angular momentum of mixed vortex beams / Z. Bouchal, [et al.] // *Proceedings of SPIE*. – 2007. – Vol. 6609. – 660907.

### Сведения об авторах

Сведения об авторах **Павельев Владимир Сергеевич, Чопорова Юлия Юрьевна, Князев Борис Александрович** см. стр. 998 этого номера.

**Осинцева Наталья Дмитриевна**, аспирант Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, лаборант-исследователь Новосибирского государственного университета. Научные интересы: терагерцовое излучение, лазеры на свободных электронах, дифракционные оптические элементы, пучки с орбитальным угловым моментом, ближнепольная микроскопия. E-mail: [natalyaosintseva@gmail.com](mailto:natalyaosintseva@gmail.com).

**Тукмаков Константин Николаевич**, инженер кафедры нанотехнологий, научный сотрудник НОЦ нанотехнологий Самарского университета. Область научных интересов: производство микро- и наноструктур, технология фокусированных ионных пучков. E-mail: [tukmakov.k@gmail.com](mailto:tukmakov.k@gmail.com).

ГРПТИ: 29.33.17

Поступила в редакцию 20 октября 2019 г. Окончательный вариант – 5 декабря 2019 г.

## Control of transverse mode content and polarization structure of terahertz coherent beams

V.S. Pavelyev<sup>1,2</sup>, Yu.Yu. Choporova<sup>3,4</sup>, N.D. Osintseva<sup>3,4</sup>, K.N. Tukmakov<sup>1,2</sup>, B.A. Knyazev<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia,

<sup>2</sup>IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia,

<sup>3</sup>Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS, Novosibirsk, Russia,

<sup>4</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

### Abstract

The paper is devoted to investigation of forming multimode coherent beams of terahertz radiation with pre-given transverse mode content and terahertz vector beams by use of silicon diffractive optical elements forming single modes from terahertz free-electron laser illuminating beam.

**Keywords:** diffractive optics, Free-electron lasers, terahertz radiation, Gaussian-Hermite modes.

**Citation:** Pavelyev VS, Choporova YuYu, Osintseva ND, Tukmakov KN, Knyazev BA. Control of transverse mode content and polarization structure of terahertz coherent beams. *Computer Optics* 2019; 43(6): 1103-1108. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1103-1108.

**Acknowledgements:** This work was supported by the grant of the RSF #19-72-20202 regarding experimental formation of beams consisting of vortex beams with opposite topological charges. The work was partly funded by the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education within a state contract with the “Crystallography and Photonics” # 007-Г3/Ч3363/26 regarding analysis of transverse structure of formed vector beams. Experiments were carried out using the shared research center “Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Centre” at the Novosibirsk FEL facility.

### References

- [1] Kulipanov GN, et al. Novosibirsk free electron laser–facility description and recent experiments. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 2015; 5(5): 798-809.
- [2] Glyavin MYu. Development and applications of THz gyrotrons. *EPJ Web of Conferences* 2017; 149: 01008.
- [3] Bubnov GM, Lesnov IV, Vdovin VF. Data rates of Sub-THz wireless telecommunication channels. *EPJ Web of Conferences* 2017; 149: 02012.
- [4] Kulipanov GN, Lisenko AA, Matvienko GG, Oshlakov VK, Kubarev VV, Chesnokov EN, Babchenko SV. Experimental study of the interaction between terahertz radiation from the

- Novosibirsk free-electron laser and water aerosol [In Russian]. *Optika Atmosfery i Okeana* 2014; 27(12): 1070-1073.
- [5] Choporova YuYu, Knyazev BA, Kulipanov GN, Pavelyev VS, Scheglov MA, Vinokurov NA, Volodkin BO, Zhabin VN. High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range. *Phys Rev A* 2017; 96(2): 023846. DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023846.
- [6] Sobolev DI, Denisov GG, Ereemeev AG, Holoptsev VV, Tsvetkov AI. Polarization-dependent TE<sub>11</sub>-to-TE<sub>11</sub>/TE<sub>01</sub> waveguide mode converter for transmission line mode switching. *EPJ Web of Conferences* 2017; 149: 04017.
- [7] Agafonov AN, Choporova YuYu, Kaveev AK, Knyazev BA, Kropotov GI, Pavelyev VS, Tukmakov KN, Volodkin BO. Control of transverse mode spectrum of Novosibirsk free electron laser radiation. *Appl Opt* 2015; 54(12): 3635-3639. DOI: 10.1364/AO.54.003635.
- [8] Pavelyev VS, Agafonov AN, Volodkin BO, Tukmakov KN, Knyazev BA, Choporova YuYu. Terahertz optical elements for control of high-power laser irradiation. *EPJ Web of Conferences* 2018; 195: 07006.
- [9] Golub MA, Karpeev SV, Krivoshlykov SG, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. An experimental-study into the power distribution over transverse-modes in a fiber-optic waveguide with the use of spatial filters. *Kvantovaya Elektronika* 1984; 11(9): 1869-1871.
- [10] Agafonov AN, Volodkin BO, Volotovskiy SG, et al. Silicon optics for focusing of terahertz laser radiation in a given two-dimensional domain. *Computer Optics* 2013; 37(4): 464-470.
- [11] Agafonov AN, Volodkin BO, Kaveev AK, Knyazev BA, Kropotov GI, Pavel'ev VS, Soifer VA, Tukmakov KN, Tsygankova EV, Choporova YuYu. Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2013; 49(2): 189-195. DOI: 10.3103/S875669901302012X.
- [12] Golub MA, Karpeev SV, Krivoshlykov SG, Prokhorov AM, Sisakyan IN, Soifer VA. Spatial filter investigation of the distribution of power between transverse modes in a fiber waveguide. *Sov J Quantum Electron* 1984; 14(9): 1255-1256. DOI: 10.1070/QE1984v014n09ABEH006201.
- [13] Soifer VA, ed. *Methods for computer design of diffractive optical elements*. New York: John Wiley & Sons Inc; 2002. ISBN: 978-0-471-09533-0.
- [14] Golub MA, Karpeev SV, Kazanskii NL, Mirzov AV, Sisakyan IN, Soifer VA, Uvarov GV. Spatial phase filters matched to transverse modes. *Sov J Quantum Electron* 1988; 18(3): 392-393. DOI: 10.1070/QE1988v018n03ABEH011528.
- [15] Soifer VA, Golub MA. *Laser beam mode selection by computer generated holograms*. CRC Press; 1994. ISBN: 0-8493-2476-9.
- [16] Alferov SV, Khonina SN, Karpeev SV. Study of polarization properties of fiber-optics probes with use of a binary phase plate. *J Opt Soc Am A* 2014; 31(4): 802-807. DOI: 10.1364/JOSAA.31.000802.
- [17] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Honkanen M, Lautanen J, Turunen J. Generation of rotating Gauss-Laguerre modes with binary-phase diffractive optics. *J Mod Opt* 1999; 46(2): 227-238. DOI: 10.1080/09500349908231267.
- [18] Winnerl S, et al. Terahertz Bessel-Gauss beams of radial and azimuthal polarization from microstructured photoconductive antennas. *Opt Express* 2009; 17(3): 1571-1576.
- [19] Kan K, et al. Radially polarized terahertz waves from a photoconductive antenna with microstructures. *Appl Phys Lett* 2013; 102(22): 221118.
- [20] Deibel JA, Escarra MD, Mittleman DM. Photoconductive terahertz antenna with radial symmetry. *Quantum Electronics and Laser Science Conference* 2005; 2: 1239-1241.
- [21] Grosjean T, et al. Linear to radial polarization conversion in the THz domain using a passive system. *Opt Express* 2008; 16(23): 18895-18909.
- [22] Koechner W. *Solid-state laser engineering*. New York: Springer-Verlag; 1988.
- [23] Khonina SN, Karpeev SV. Grating-based optical scheme for the universal generation of inhomogeneously polarized laser beams. *Appl Opt* 2010; 49(10): 1734-1738. DOI: 10.1364/AO.49.001734.
- [24] Knyazev BA, et al. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: comparative description of imaging techniques with examples of application. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 2011; 32: 1207-1222.
- [25] Khonina SN, Savelyev DA. High-aperture binary axicons for the formation of the longitudinal electric field component on the optical axis for linear and circular polarizations of the illuminating beam. *J Exp Theor Phys* 2013; 117(4): 623-630. DOI: 10.1134/S1063776113120157.
- [26] Degtyarev SA, Porfirev AP, Khonina SN. Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon. *Appl Opt* 2016; 55(12): B44-B48. DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
- [27] Khonina SN, Porfirev AP. 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons. *Appl Phys B* 2018; 124(9): 191. DOI: 10.1007/s00340-018-7060-4
- [28] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG, Schulz S, O'Faolain L. Two-petal laser beam near a binary spiral axicon with topological charge 2. *Opt Laser Technol* 2019; 119: 105649. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105649.
- [29] Bouchal Z, et al. Orbital angular momentum of mixed vortex beams. *Proc SPIE* 2007; 6609: 660907.

#### Author's information

The information about authors **Vladimir Sergeevich Pavelyev**, **Yuliya Yuryevna Choporova** and **Boris Aleksandrovich Knyazev** you can find on page 1000 of this issue.

**Natalya Dmitrievna Osintseva**, PhD student of the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAN, research assistant of Novosibirsk State University. Research interests: terahertz radiation, free electron lasers, diffractive optical elements, beams with orbital angular momentum, near-field microscopy. E-mail: [natalyaosintseva@gmail.com](mailto:natalyaosintseva@gmail.com).

**Konstantin Nikolaevich Tukmakov**, engineer of Nanoengineering department, researcher of REC "Nanotechnology" of Samara University. Research interests: fabrication of micro- and nanostructures, technology focused ion beams. E-mail: [tukmakov.k@gmail.com](mailto:tukmakov.k@gmail.com).

*Received October 22, 2019. The final version – December 05, 2019.*