

Управление поперечно-модовой и поляризационной структурой терагерцовых когерентных пучков

В.С. Павельев^{1,2}, Ю.Ю. Чопорова^{2,3,4}, Н.Д. Осинцева^{3,4}, К.Н. Тукмаков^{1,2}, Б.А. Князев^{2,3,4}
¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,
² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,
³ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск,
⁴ 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 TEM₀₁ (или TEM₁₀), 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 TEM₀₁ и TEM₁₀ (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.

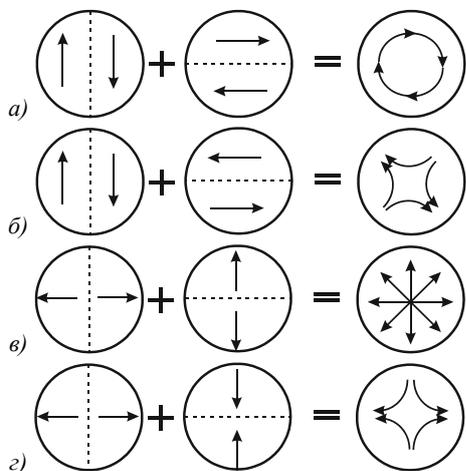


Рис. 1. Принцип формирования векторно-поляризованных пучков Гаусса-Лагерра с помощью сложения поляризованных пучков Гаусса-Эрмита

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 320×240 элементов (16×12 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. 3з). 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].

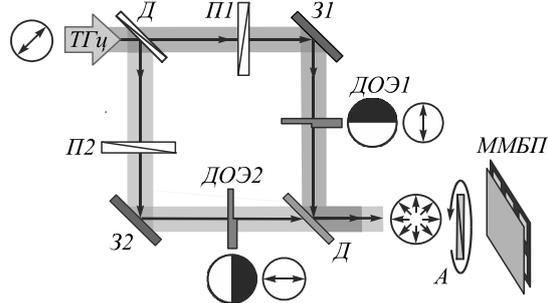


Рис. 2. Схема эксперимента. Интерферометр Маха-Цандера. Д – плёночные полипропиленовые светоделители; 31, 32 – плоские алюминиевые зеркала; П1, П2 – ортогонально-ориентированные поляризаторы в соответствующих плечах интерферометра; ДОЭ1, ДОЭ2 – дифракционные оптические элементы, формирующие моды ЭГ,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

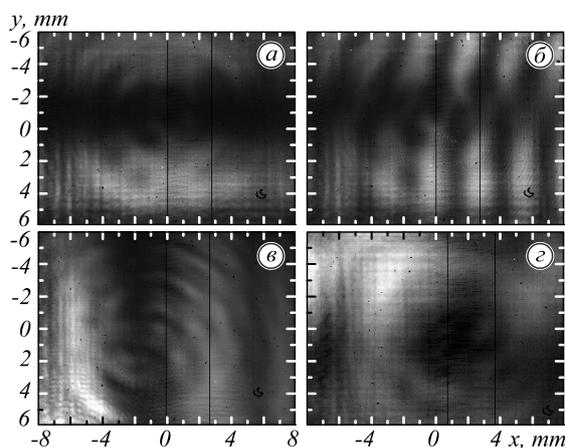


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования формирования векторных пучков (экспонированные области показаны белым): распределение интенсивности пучка на выходе с анализатором, расположенным вертикально (а); результат интерференции пучка Гаусса-Эрмита (1,0) с исходным Гауссовым пучком (б), пучка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

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

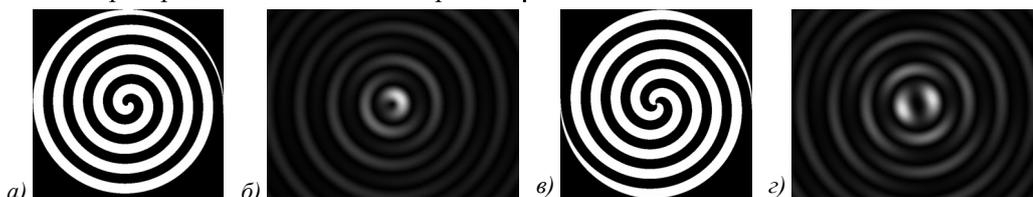


Рис. 4. Фазовые функции ДОЭ (чёрный цвет соответствует значению фазы 0, белый – π) (а, в), распределения интенсивности и фазы формируемых вращающихся пучков (б, з) с топологическими зарядами $l = +1, +2$. Фаза $0-\pi$ показана оттенками серого

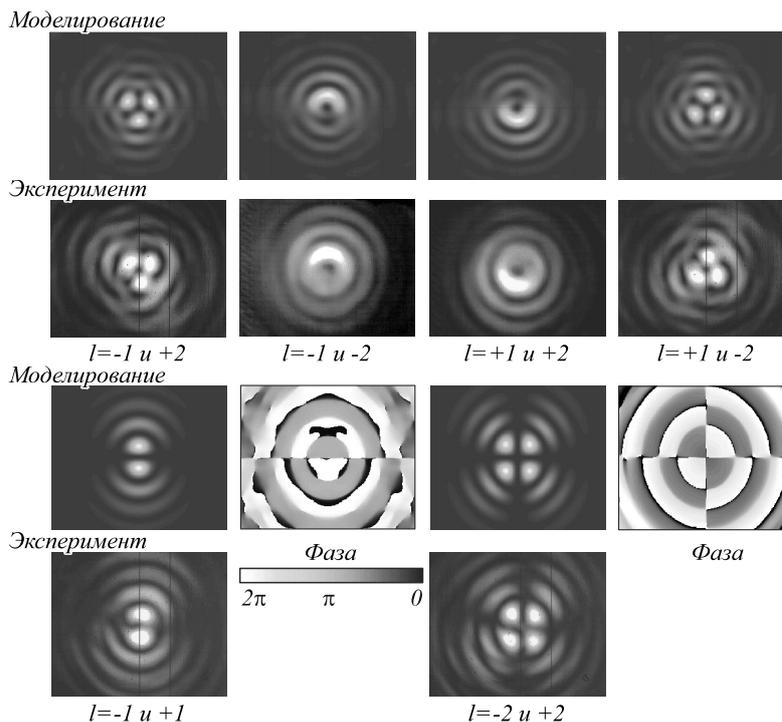


Рис. 5. Распределения интенсивности многомодовых пучков с ОУМ. Верхний ряд – результаты моделирования, нижний – эксперимент. Распределение фазы демонстрирует отсутствие ОУМ в многомодовых пучках одинаковой величины ОУМ и интенсивности, но разного знака

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 РФФИ (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 TE₁₁-to-TE₁₁/TE₀₁ 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. Krivoslykov, 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. Krivoslykov, 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. Koehner. – 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. Savelyev // 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.

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.

ГРНТИ: 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^{1,2}, Yu.Yu. Choporova^{3,4}, N.D. Osintseva^{3,4}, K.N. Tukmakov^{1,2}, B.A. Knyazev^{3,4}

¹Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia,

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

³Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS, Novosibirsk, Russia,

⁴Novosibirsk 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, Eremeev AG, Holoptsev VV, Tsvetkov AI. Polarization-dependent TE₁₁-to-TE₁₁/TE₀₁ 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, Krivoslylykov 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, Krivoslylykov 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.

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.

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