

## Экспериментальное исследование самовосстановления терагерцовых Бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом

В.С. Павельев<sup>1,2</sup>, К.Н. Тукмаков<sup>1</sup>, А.С. Решетников<sup>1</sup>, В.В. Герасимов<sup>3,4</sup>, Н.Д. Осинцева<sup>3,4</sup>, Б.А. Князев<sup>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> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1;

<sup>4</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 11

### Аннотация

Приведены результаты экспериментального исследования самовосстановления терагерцовых Бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом со значениями топологического заряда  $l=3$  и  $l=4$  в свободном пространстве после прохождения неоднородной среды.

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, бинарный фазовый аксикон, Бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом.

**Цитирование:** Павельев, В.С. Экспериментальное исследование самовосстановления терагерцовых Бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом / В.С. Павельев, К.Н. Тукмаков, А.С. Решетников, В.В. Герасимов, Н.Д. Осинцева, Б.А. Князев // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 5. – С. 673-677. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-845.

**Citation:** Pavelyev VS, Tukmakov KN, Reshetnikov AS, Gerasimov VV, Osintseva ND, Knyazev BA. Experimental investigation of the self-healing of terahertz Bessel beams with orbital angular momentum. Computer Optics 2021; 45(5): 673-677. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-845.

### Введение

Замечательные свойства пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ), проявляемые ими при распространении в свободном пространстве, волноводах, а также в неоднородных средах, привлекают большое внимание специалистов, работающих в области создания систем связи, систем дистанционного зондирования, а также лидарных систем в различных диапазонах электромагнитного спектра. В [1, 2] приведены обзоры работ, посвященных исследованию свойств пучков с ОУМ (или «вращающихся пучков») и их применениям в различных диапазонах от рентгена до радиодиапазона. Теоретический анализ таких пучков приведен в [3]. Бесселевы пучки когерентного излучения с орбитальным угловым моментом, являющиеся собственными модами свободного пространства, представляют особый интерес для телекоммуникационных и лидарных задач. Помимо свойств самовоспроизведения и сохранения взаимной ортогональности при распространении в свободном пространстве [4], Бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом обладают еще одним замечательным свойством – свойством восстановления поперечной амплитудно-фазовой структуры после прохождения неоднородной среды, или свойством *самовосстановления*.

Это свойство исследовалось как в оптическом диапазоне (см., например, [5]), так и в микроволновом диапазоне [6]. Теоретический анализ распростра-

нения вращающихся пучков в неоднородных средах приведен в обзоре [7]. Сравнение результатов теоретического анализа распространения Бесселевых пучков в неоднородных средах с экспериментальными результатами, полученными в видимом диапазоне, приведено в работе [8].

Появление источников когерентного терагерцового излучения, в том числе мощного [9], сформировало интерес исследователей к возможности построения лидарных систем [10] (что в значительной степени связано с наличием спектральных линий ряда веществ в этом диапазоне), а также телекоммуникационных систем [11] терагерцового диапазона. В работе [12] приведены результаты исследования полимерных элементов, формирующих терагерцовые Бесселевы пучки, которые были изготовлены с помощью технологии трехмерной печати, однако для управления мощными пучками терагерцового излучения необходимо использовать материал подложки с большой лучевой стойкостью.

Появление силовых кремниевых дифракционных оптических элементов терагерцового диапазона открыло возможность формирования мощных терагерцовых пучков с произвольным поперечно-модовым составом, в том числе Бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом [13]. В работе [14] приведены первые результаты исследования эффекта самовосстановления терагерцовых Бесселевых пучков с ОУМ со значением топологического заряда  $l=\pm 1$ , сформированных с помо-

щью кремниевых дифракционных оптических элементов из освещающего пучка Новосибирского лазера на свободных электронах [9]. Длина волны освещающего излучения составляла  $\lambda = 141$  мкм, в качестве неоднородной фазовой среды использовалась пластина из пенополиэтилена [14].

Типичные результаты, полученные в работе [14], приведены на рис. 1.

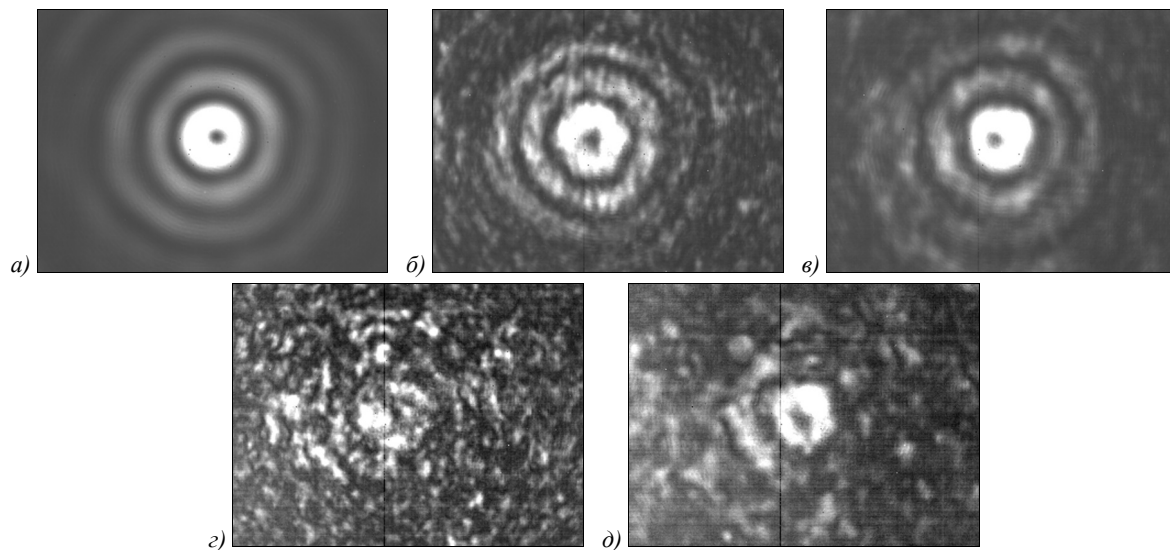


Рис. 1. Самовосстановление Бесселева пучка (эксперимент) [14]: исходный Бесселев пучок  $|l| = 1$ , сформированный дифракционным оптическим элементом (а); распределение интенсивности за пластиной из пенополиэтилена на расстоянии 60 мм (б); распределение интенсивности за пластиной из пенополиэтилена на расстоянии 100 мм (в); распределение интенсивности за более толстой пластиной из пенополиэтилена переменной толщины на расстоянии 60 мм (г); распределение интенсивности за более толстой пластиной из пенополиэтилена переменной толщины на расстоянии 100 мм (д)

На основании полученных экспериментальных результатов в [14] было показано, что терагерцовые Бесселевы пучки с малым значением топологического заряда ( $|l| = 1$ ) обладают свойством самовосстановления после прохождения неоднородных фазовых сред.

В настоящей работе приведены результаты исследования свойства самовосстановления у терагерцовых Бесселевых пучков с ОУМ со значениями топологического заряда  $l = 3$  и  $l = 4$  в свободном пространстве после прохождения через неоднородную среду.

**1. Элементы для генерации терагерцовых Бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом со значениями топологического заряда  $l = 3$  и  $l = 4$**

Терагерцовые Бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом со значениями топологического заряда  $l = 3$  и  $l = 4$  формировались из освещающего пучка Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) [9] с рабочей длиной волны  $\lambda = 141$  мкм с помощью бинарных кремниевых дифракционных оптических элементов с фазовой функцией, рассчитанной с помощью формул, приведенных в работе [15], и изготовленных с помощью технологии, описанной в работе [16]. Элементы представляли из себя бинарные фазовые аксиконы с зонами спиральной формы (рис. 2).

На рис. 3 представлены фотографии изготовленных элементов в оправках.

Оба элемента, представленные на рис. 3, были выполнены на пластинах из высокоомного кремния

диаметром  $D = 50,5$  мм и толщиной  $s = 1,5$  мм. Расчетная высота бинарного микрорельефа составляла  $h = 29,1$  мкм, что соответствовало длине волны освещающего пучка  $\lambda = 141$  мкм. Расчетный период дифракционной структуры составлял  $d = 3,2$  мм. Антиотражающее покрытие на оптические поверхности элементов не наносилось.

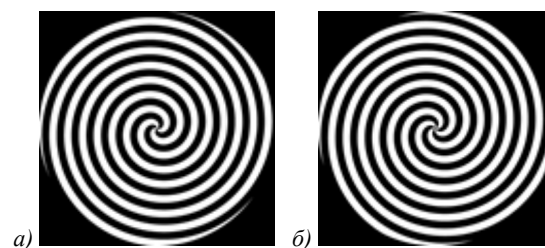


Рис. 2. Рассчитанные фазовые функции элементов, формирующих Бесселевы пучки с ОУМ с топологическим зарядом  $l = 3$  (а) и  $l = 4$  (б). Чёрный цвет соответствует значению фазовой функции элемента 0, белый цвет –  $\pi$

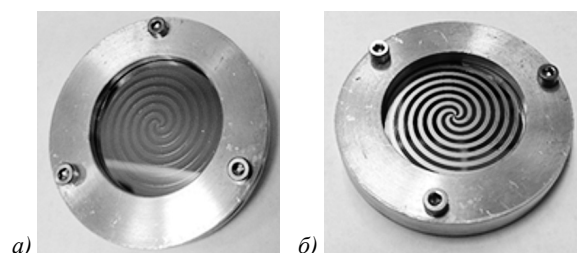


Рис. 3. Изготовленные кремниевые элементы, предназначенные для формирования Бесселевых пучков с топологическим зарядом  $l = 3$  (а) и  $l = 4$  (б) в оправках

### 2. Экспериментальное исследование

Способность изготовленных элементов (рис. 3) трансформировать терагерцовый Гауссов пучок в Бесселеву моду с заданным орбитальным угловым моментом, а также устойчивость сформированных пучков к распространению в неоднородных средах были исследованы в ходе оптического эксперимента, схема которого приведена на рис. 4.

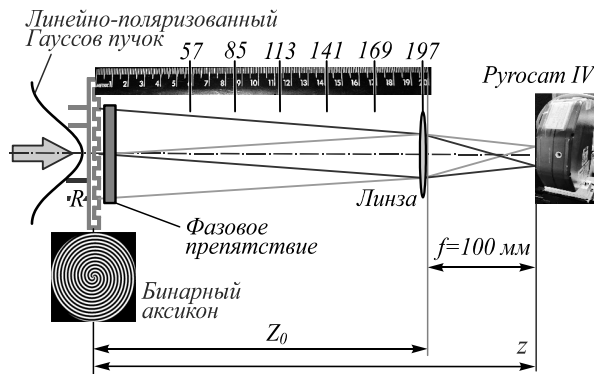


Рис. 4. Оптическая схема эксперимента

Лазер [9] генерировал монохроматическое линейно-поляризованное излучение с длительностью импульса 100 пс при частоте повторения 5,6 МГц. Значение модового радиуса Гауссова пучка НЛСЭ в плоскости установки аксиконов составляло  $\sigma = 12,1$  мм. Распределение интенсивности регистрировалось пироэлектрическим приемником Pyrocam IV с размером матрицы  $25,6 \times 25,6$  мм<sup>2</sup>. Сначала были сформированы Бесселевы пучки с ОУМ, интенсивность которых регистрировалась на расстояниях от аксикона до камеры 57, 85, 113, 141, 169 и 197 мм в отсутствие препятствия и линзы между аксиконом и приемником (рис. 4). Результаты измерений приведены на рис. 5а и 6а для пучков с топологическими зарядами  $l=3$  и  $l=4$  соответственно. Далее для исследования устойчивости сформированных пучков к распространению в неоднородных средах на расстоянии 7 мм от аксикона располагалось препятствие из вспененного полипропилена толщиной 8 мм («фазовое препятствие» на рис. 4). Линза между препятствием и приемником при этом отсутствовала. Результаты соответствующих измерений интенсивностей для ранее указанных расстояний приведены на рис. 5б и 6б. Анализ результатов, приведенных на рис. 5б и 6б, демонстрирует восстановление поперечного исходного распределения интенсивности, нарушенного после прохождения в неоднородной среде, в ходе распространения в свободном пространстве. Однако трудно только по распределению интенсивности однозначно судить о модовом составе восстановленного пучка [4]. Поэтому в следующей серии экспериментов для оценки качества восстановления пучка после препятствия устанавливалась кремниевая линза с фокусным расстоянием  $f=100$  мм. Изображение снимали в фокальной плоскости линзы, которая отда-

лялась от аксикона на одно из расстояний, на которых проводились измерения ранее. Соответствующие результаты приведены на рис. 5в и 6в. Зная свойства, проявляемые Бесселевыми модами с орбитальным угловым моментом при прохождении через линзовый каскад [4], можно утверждать, что результаты, приведенные на рис. 5б, в и рис. 6б, в, демонстрируют высокое содержание соответствующей Бесселевой моды в «восстановленном» пучке для каждого из случаев  $l=3$  и  $l=4$  соответственно.

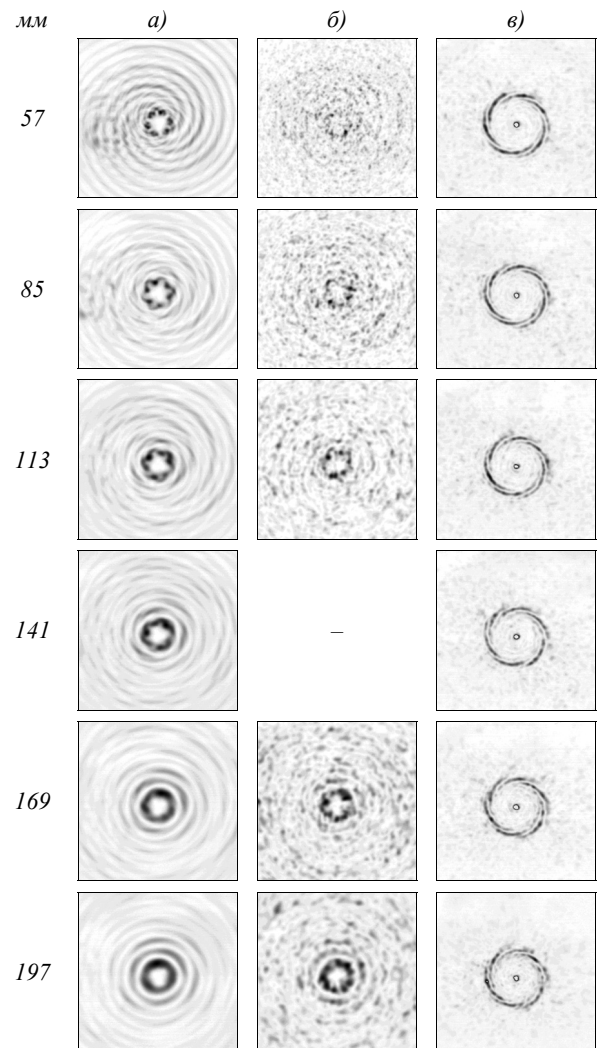


Рис. 5. Результаты экспериментального исследования Бесселевой моды с топологическим зарядом  $l=3$ . Распределения интенсивности в сечениях: сформированного пучка (а); пучка, прошедшего через препятствие (б); пучка, прошедшего через препятствие, в фокусе кремниевой линзы (в). Распределение интенсивности в сечении пучка, прошедшего через препятствие, на расстоянии 141 мм не было измерено из-за сбоя системы измерения (негативные изображения)

### Заключение

С помощью кремниевых дифракционных оптических элементов были сформированы терагерцовые когерентные пучки с орбитальным угловым момен-

том с топологическими зарядами  $l=3$  и  $l=4$ . Исследовано их прохождение через неоднородную среду. Показано, что пучки обладают способностью к самовосстановлению своей поперечной структуры после прохождения неоднородной среды.

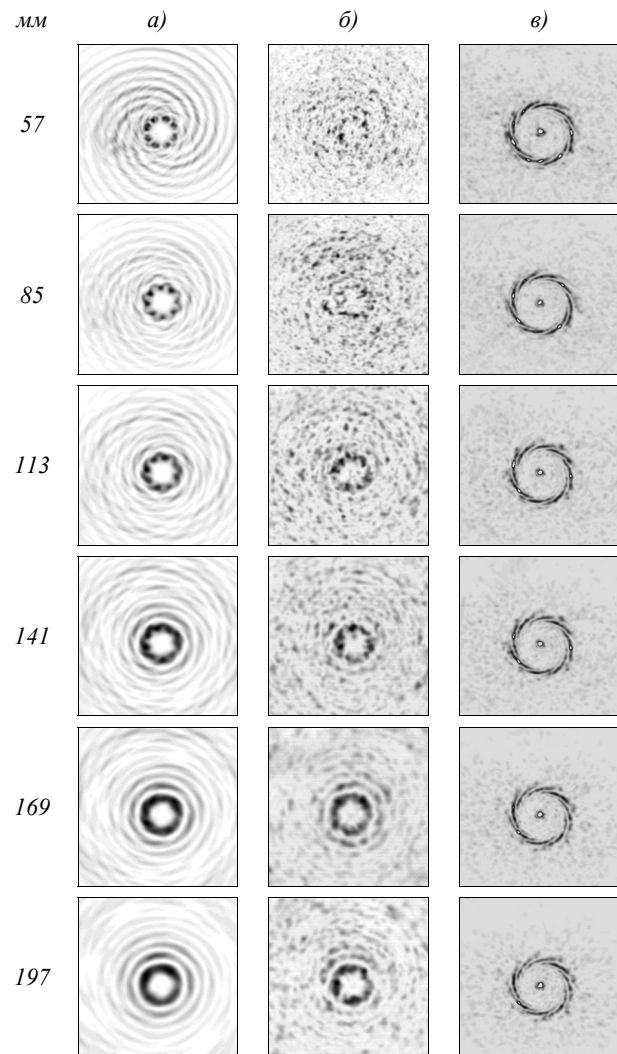


Рис. 6. Результаты экспериментального исследования Бесселевой моды с топологическим зарядом  $l=4$ . Распределения интенсивности в сечениях: сформированного пучка (а); пучка, прошедшего через препятствие (б); пучка, прошедшего через препятствие, в фокусе кремниевой линзы (в) (негативные изображения)

В данной работе не проводились исследования распространения через неоднородные среды терагерцевых поляризованных Бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом, особенности распространения в свободном пространстве которых исследовались в работе [17], где для генерации терагерцевых поляризованных Бесселевых пучков использовались спиральные фазовые пластинки, аксиконы и четвертьволновые пластинки.

В работе [18] авторами продемонстрирован подход к формированию терагерцевого Бесселева пучка с ра-

диальной поляризацией 2-го порядка, основанный на использовании кремниевого субволнового аксикона.

В следующих работах авторы планируют исследовать устойчивость терагерцевых Бесселевых пучков с различными значениями топологического заряда и различными поляризационными состояниями к распространению в неоднородных средах.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-72-20202. В работе использованы результаты экспериментов с бинарными аксиконами, выполненных в ИЯФ СО РАН с использованием оборудования ЦКП "СЦСТИ" на базе УНУ "Новосибирский ЛСЭ".

### Литература

1. **Князев, Б.А.** Закрученные пучки: от рентгена до радиодиапазона / Б.А. Князев, В.С. Павельев, В.Г. Сербо, Ю.Ю. Чопорова, Б.О. Володкин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2015. – Т. 5, № 2. – С. 158-167.
2. **Khonina, S.N.** Bessel beam: Significance and applications – A progressive review / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.V. Karpeev, M.A. Butt // Micromachines. – 2020. – Vol. 11, Issue 11. – 997. – DOI: 10.3390/mi11110997.
3. **Князев, Б.А.** Пучки фотонов с ненулевой проекцией орбитального момента импульса: новые результаты / Б.А. Князев, В.Г. Сербо // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188, № 5. – С. 508-539. – DOI: 10.3367/UFNr.2018.02.038306.
4. 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.
5. **Васильев, В.С.** Распространение пучков Бесселя и суперпозиций вихревых пучков в атмосфере / В.С. Васильев, А.И. Капустин, Р.В. Скиданов, Н.А. Ивлиев, В.В. Подлипнов, С.В. Ганчевская // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 376-384. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-376-384.
6. **Bassotti, A.** Topological robustness of phase singularities at microwave frequencies / A. Bassotti, M. Barbuto, A. Alú, F. Bilotti, A. Toscano // 2019 Thirteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials). – 2019. – P. X-062-X-064.
7. **Soifer, V.A.** Vortex beams in turbulent media: review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepakina // Computer Optics. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
8. **Mphuthi, N.** Are Bessel beams resilient to aberrations and turbulence? / N. Mphuthi, R. Botha, A. Forbes // Journal of the Optical Society of America A. – 2018. – Vol. 35. – P. 1021-1027. – DOI: 10.1364/JOSAA.35.001021.
9. **Shevchenko, O.A.** The Novosibirsk Free Electron Laser-unique source of terahertz and infrared coherent radiation / O.A. Shevchenko, V.S. Arbuzov, N.A. Vinokurov, P.D. Vobly, V.N. Volkov, Ya.V. Getmanov, Ya.I. Gorbachev, I.V. Davidyuk, O.I. Deychuly, E.N. Demytyev, B.A. Dovzhenko, B.A. Knyazev, E.I. Kolobanov, A.A. Kondakov, V.R. Kozak, E.V. Kozyrev, V.V. Kubarev, G.N. Kulipanov, E.A. Kuper, I.V. Kuptsov, G.Ya. Kurkin, S.A. Krutikhin, L.E. Medvedev, S.V. Motygin, V.K. Ovchar, V.N. Osipov, V.M. Petrov, A.M. Pilan, V.M. Popik, V.V. Repkov, T.V. Salikova, I.K. Sedlyarov, S.S. Serebnyakov, A.N. Skirinsky, S.V. Tararyshkin,

- A.G. Tribendis, V.G. Tcheskidov, K.N. Chernov, M.A. Scheglov // *Physics Procedia* – 2016. – Vol. 84 – P. 13-18. – DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.004.
10. **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. Ошлаков, В.В. Кубарев, Е.Н. Чесноков, С.В. Бабченко // *Оптика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 27, № 12. – С. 1070-1073.
  11. **Pavelyev, V.S.** Towards multichannel terahertz telecommunication based on mode division multiplexing / V.S. Pavelyev, K.N. Tukmakov, Yu.Yu. Choporova, N.D. Osintseva, B.A. Knyazev // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2299. – 030002. – DOI: 10.1063/5.0030592.
  12. **Wei, X.** Generation of arbitrary order Bessel beams via 3D printed axicons at the terahertz frequency range / X. Wei, C. Liu, L. Niu, Z. Zhang, K. Wang, Z. Yang, J. Liu // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54. – P. 10641-10649. – DOI: 10.1364/AO.54.010641.
  13. **Choporova, Y.Y.** High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range / Y.Y. 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.
  14. **Knyazev, B.A.** Transmission of high-power terahertz beams with orbital angular momentum through atmosphere / B.A. Knyazev, Yu.Yu. Choporova, V.S. Pavelyev, N.D. Osintseva, B.O. Volodkin // 41<sup>st</sup> International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). – 2016. – P. 1-2. – DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758816.
  15. **Khonina, S.N.** Trochoston / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M.V. Shinkaryev, G.V. Uspleniev // *Optics Communications*. – 1992. – Vol. 91, Issues 3-4, – P. 158-162. – DOI: 10.1016/0030-4018(92)90430-Y.
  16. **Агафонов, А.Н.** Кремниевые дифракционные оптические элементы для мощного монохроматического терагерцового излучения / А.Н. Агафонов, Б.О. Володкин, А.К. Кавеев, Б.А. Князев, Г.И. Кропотов, В.С. Павельев, В.А. Соифер, К.Н. Тукмаков, Е.В. Цыганкова, Ю.Ю. Чопорова // *Автоматика*. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 98-105.
  17. **Wu, Z.** Vectorial diffraction properties of THz vortex Bessel beams / Z. Wu, X. Wang, W. Sun, S. Feng, P. Han, J. Ye, Y. Yu, Y. Zhang // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26. – P. 1506-1520. – DOI: 10.1364/OE.26.001506.
  18. **Pavelyev, V.S.** Silicon subwavelength axicons for terahertz beam polarization transformation / V.S. Pavelyev, S.A. Degtyarev, K.N. Tukmakov, A.S. Reshetnikov, B.A. Knyazev, Yu.Yu. Choporova // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1745. – 012022. – DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012022.

#### *Сведения об авторах*

**Павельев Владимир Сергеевич**, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой нанотехнологий Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва; главный научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанотехнологии и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур. E-mail: [nano@ssau.ru](mailto:nano@ssau.ru).

**Тукмаков Константин Николаевич**, инженер кафедры нанотехнологий Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: производство микро- и наноструктур, технология фокусированных ионных пучков. E-mail: [tukmakov.k@gmail.com](mailto:tukmakov.k@gmail.com).

**Решетников Антон Сергеевич**, старший лаборант кафедры нанотехнологий Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: изготовление микро- и наноструктур. E-mail: [ReshetnikovAntonio@yandex.ru](mailto:ReshetnikovAntonio@yandex.ru).

**Герасимов Василий Валерьевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: оптика и фотоника, терагерцовое и инфракрасное излучение, метаматериалы, биомедицинские приложения. E-mail: [v.v.gerasimov3@gmail.com](mailto:v.v.gerasimov3@gmail.com).

**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).

**Князев Борис Александрович**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, заведующий научно-исследовательской лабораторией прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: оптика, спектроскопия, лазеры, терагерцовое излучение, физика плазмы, мощные пучки зараженных частиц. E-mail: [ba\\_knyazev@phys.nsu.ru](mailto:ba_knyazev@phys.nsu.ru).

ГРНТИ: 29.31.17

*Поступила в редакцию 5 декабря 2020 г. Окончательный вариант – 27 мая 2021 г.*

---

# Experimental investigation of the self-healing of terahertz Bessel beams with orbital angular momentum

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

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

<sup>2</sup>IPSI RAS – Branch of the Federal Research Center for Crystallography and Photonics RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya St., 151,

<sup>3</sup>Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova St., 1;

<sup>4</sup>Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Novosibirsk, Russia, Lavrentiev Ave, 11

## Abstract

Experimental results of the investigation of self-healing properties of terahertz Bessel beams with orbital angular momentum (OAM) with topological charges of  $l=3$  and  $l=4$  in free space after passing through a dispersive medium are presented.

**Keywords:** terahertz radiation, binary phase axicon, Bessel beams with orbital angular momentum.

**Citation:** Pavelyev VS, Tukmakov KN, Reshetnikov AS, Gerasimov VV, Osintseva ND, Knyazev BA. Experimental investigation of the self-healing of terahertz Bessel beams with orbital angular momentum. *Computer Optics* 2021; 45(5): 673-677. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-845.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation under grant # 19-72-20202. The experiments were carried out using the infrastructure of the shared research facility "Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center (SSTRC)", based on NovoFEL at BINP SB RAS.

## References

- [1] Knyazev BA, Pavelyev VS, Serbo VG, Choporova YY, Volodkin BO. Vortex beams: from X-rays to radiowaves [In Russian]. *Interekspo Geo-Sibirj* 2015; 2: 158-167.
  - [2] Khonina SN, Kazanskiy NL, Karpeev SV, Butt MA. Bessel beam: Significance and applications – A progressive review. *Micromachines* 2020; 11(11): 997. DOI: 10.3390/mi11110997.
  - [3] Knyazev BA, Serbo VG. Beams of photons with nonzero orbital angular momentum projection: new results. *Phys Usp* 2018; 61: 449-479. DOI: 10.3367/UFNe.2018.02.038306.
  - [4] Soifer VA, ed. *Computer design of diffractive optics*. Woodhead Publishing and Cambridge International Science Publishing; 2012. ISBN : 978-1-84569-635-1.
  - [5] Vasilyev VS, Kapustin AI, Skidanov RV, Podlipnov VV, Ivliev NA, Ganchevskaya SV. Experimental investigation of the stability of Bessel beams in the atmosphere. *Computer Optics* 2019; 43(3): 376-384. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-376-384.
  - [6] Bassotti A, Barbuto M, Alu A, Bilotti F, Toscano A. Topological robustness of phase singularities at microwave frequencies. *Thirteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)* 2019: X-062-X-64.
  - [7] Soifer VA, Korotkova O, Khonina SN, Shchepakina EA. Vortex beams in turbulent media: review. *Computer Optics* 2016; 40(5): 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
  - [8] Mphuthi N, Botha R, Forbes A. Are Bessel beams resilient to aberrations and turbulence? *J Opt Soc Am A* 2018; 35: 1021-1027. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001021.
  - [9] Shevchenko OA, Arbutov VS, Vinokurov NA, Vobly PD, Volkov VN, Getmanov YV, Gorbachev YI, Davidyuk IV, Deychuly OI, Dementyev EN, Dovzhenko BA, Knyazev BA, Kolobanov EI, Kondakov AA, Kozak VR, Kozlyev EV, Kubarev VV, Kulipanov GN, Kuper EA, Kuptsov IV, Kurkin GYa, Krutikhin SA, Medvedev LE, Motygin SV, Ovchar VK, Osipov VN, Petrov VM, Pilan AM, Popik VM, Repkov VV, Salikova TV, Sedlyarov IK, Serednyakov SS, Skrinsky AN, Tararyshkin SV, Tribendis AG, Tcheskidov VG, Chernov KN, Scheglov MA. The Novosibirsk Free Electron Laser – unique source of terahertz and infrared coherent radiation. *Physics Procedia* 2016; 84: 13-18. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.004.
  - [10] 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. *Atmospheric and Oceanic Optics* 2015; 28: 165-168. DOI: 10.1134/S1024856015020062.
  - [11] Pavelyev VS, Tukmakov KN, Choporova YuYu, Osintseva ND, Knyazev BA. Towards multichannel terahertz telecommunication based on mode division multiplexing. *AIP Conf Proc* 2020; 2299: 030002. DOI: 10.1063/5.0030592
  - [12] Wei X, Liu C, Niu L, Zhang Z, Wang K, Yang Z, Liu J. Generation of arbitrary order Bessel beams via 3D printed axicons at the terahertz frequency range. *Appl Opt* 2015; 54: 10641-10649. DOI: 10.1364/AO.54.010641.
  - [13] Choporova YY, 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.
  - [14] Knyazev BA, Choporova YuYu, Pavelyev VS, Osintseva ND, Volodkin BO. Transmission of high-power terahertz beams with orbital angular momentum through atmosphere. *41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)* 2016: 1-2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758816.
  - [15] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Shinkaryev MV, Uspleniev GV. Trochoson. *Opt Commun* 1992; 91(3-4): 158-162. DOI: 10.1016/0030-4018(92)90430-Y.
  - [16] 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. *Optoelectron Instrum Data Process* 2013; 49(2): 189-195. DOI: 10.3103/S875669901302012X.
- [17] Wu Z, Wang X, Sun W, Feng Sh, Han P, Ye J., Yu Yu, Zhang Y. Vectorial diffraction properties of THz vortex Bessel beams. *Opt Express* 2018; 26: 1506-1520. DOI: 10.1364/OE.26.001506.
- [18] Pavelyev VS, Degtyarev SA, Tukmakov KN, Reshetnikov AS, Knyazev BA, Choporova YuYu. Silicon subwavelength axicons for terahertz beam polarization transformation. *J Phys Conf Ser* 2021; 1745: 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012022.
- 

#### *Authors' information*

**Vladimir Sergeevich Pavelyev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, head of Nanoengineering department of Samara National Research University, principal researcher of the IPSI RAS. Research interests: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, optical metamaterials synthesis, technologies for forming of micro- and nanostructures. E-mail: [nano@ssau.ru](mailto:nano@ssau.ru).

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

**Anton Sergeevich Reshetnikov**, senior laboratory assistant of Nanoengineering department of Samara National Research University. Research interests: fabrication of micro- and nanostructures. E-mail: [ReshetnikovAntonio@yandex.ru](mailto:ReshetnikovAntonio@yandex.ru).

**Vasily Valerievich Gerasimov**, PhD in Physics and Mathematics, senior researcher of the Budker Institute of Nuclear Physics, senior researcher of the Research Laboratory of Applied Electrodynamics, Novosibirsk State University. Research interests: optics and photonics, terahertz and infrared radiation, metamaterials, biomedical applications. E-mail: [v.v.gerasimov3@gmail.com](mailto:v.v.gerasimov3@gmail.com).

**Natalya Dmitrievna Osintseva**, PhD student of the Budker Institute of Nuclear Physics, 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).

**Boris Aleksandrovich Knyazev**, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, principal researcher at Budker Institute of Nuclear Physics and Head of Laboratory of Applied Electrodynamics at Novosibirsk State University. Research interests: optics, spectroscopy, lasers, terahertz radiation, plasma physics, high-power electron and ion beams. E-mail: [ba\\_knyazev@phys.nsu.ru](mailto:ba_knyazev@phys.nsu.ru).

---

*Received December 5, 2020. The final version – May 27, 2021.*

---