

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-04-3-15

УДК 535.015, 535.421

Идентификация эрмит-гауссовых и бесселевых мод терагерцового пучка с помощью дифракционных оптических элементов

Наталья Дмитриевна Осинцева^{1✉}, Василий Валерьевич Герасимов²,
Юлия Юрьевна Чопорова³, Валерия Дмитриевна Кукотенко⁴,
Владимир Сергеевич Павельев⁵, Борис Александрович Князев⁶

^{1, 2, 3, 4}Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁵Самарский университет, Самара, Россия

⁵Институт систем обработки изображений Российской академии наук — филиал федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, Самара, Россия

⁶Без аффилиации

¹natalyaosintseva@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0750-4135>

²v.gerasimov@nsu.ru <https://orcid.org/0000-0003-1282-6005>

³yulia.choporova@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-4043-8114>

⁴kukotenkovaleria@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0607-3334>

⁵pavelyev10@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2803-2138>

⁶b.a.knyazev@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-4187-3249>

Аннотация

Предмет исследования. Исследована возможность идентификации эрмит-гауссовых и бесселевых мод в составе пучка терагерцового излучения с помощью дифракционных оптических элементов. **Цель работы.** Разработка и апробация метода идентификации модового состава пучка излучения терагерцового диапазона с помощью бинарных фазовых дифракционных оптических элементов для одномодового и многомодового случаев. **Метод.** Предложенный подход основан на детектировании фурье-образа пучка после прохождения элемента с фазовой функцией, согласованной с искомой модой. Пучок с высоким содержанием исследуемой моды формировался с помощью бинарного фазового дифракционного элемента, далее освещал фильтрующую систему из аналогичного элемента и линзы. В случае совпадения мод, с которыми были согласованы формирующий и фильтрующий элементы, наблюдалось светлое пятно в центре, так называемый положительный отклик. В противном случае в центре наблюдались радиально-симметрично расположенные лепестки с темным пятном в центре, что соответствует негативному отклику. **Основные результаты.** Приводятся экспериментальные результаты по идентификации эрмит-гауссовых (с номерами (1, 0) и (0, 1)) и бесселевых мод (со значением модуля топологического заряда $|l| = 1, 2, 3, 4$) в случае одномодового пучка. Для случая многомодового пучка формировалась комбинация из бесселевых пучков с топологическими зарядами -1 и -2 . **Практическая значимость.** Беспроводная передача данных на терагерцовых частотах (целевой диапазон частот следующего поколения связи 6G) многомодовыми бесселевыми пучками позволит значительно повысить информационную плотность передаваемых данных и достичь скоростей порядка Тбит/с. Используемый в работе метод может быть применён для идентификации модового состава пучка в случае передачи нескольких сигналов на одной частоте.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон, дифракционная оптика, фазовый аксикон, пучки Бесселя, пучки Эрмита–Гаусса, оптические вихри

Благодарность: авторы выражают благодарность Г.Н. Кулипанову и Н.А. Винокурову за поддержку работы, команду лазера на свободных электронах за обеспечение стабильной работы установки и Н.А. Николаева за полезные рекомендации и помощь в редактировании рукописи. В работе использовалось оборудование центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» на базе уникальной научной установки «Новосибирский ЛСЭ» в ИЯФ СО РАН.

Ссылка для цитирования: Осинцева Н.Д., Герасимов В.В., Чопорова Ю.Ю., Кукотенко В.Д., Павельев В.С., Князев Б.А. Идентификация эрмит-гауссовых и бесселевых мод терагерцового пучка с помощью дифракционных оптических элементов // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 4. С. 3–15. <https://orcid.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-3-15>

Коды OCIS: 050.1380, 070.6110, 140.2600

Identification of Hermite–Gaussian and Bessel modes of terahertz beam with diffractive optical elements

NATALYA D. OSINTSEVA¹✉, VASILY V. GERASIMOV², YULIA YU. CHOPOROVA³,
VALERIA D. KUKOTENKO⁴, VLADIMIR S. PAVELYEV⁵, BORIS A. KNYAZEV⁶

^{1, 2, 3, 4}*Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

⁵*Samara National Research University, Samara, Russia*

⁵*Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences — Branch of the Federal Research Centre “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia*

⁶*No affiliation*

¹*natalyaosintseva@gmail.com* <https://orcid.org/0000-0002-0750-4135>

²*v.gerasimov@nsu.ru* <https://orcid.org/0000-0003-1282-6005>

³*yulia.choporova@gmail.com* <https://orcid.org/0000-0003-4043-8114>

⁴*kukotenkovaleria@gmail.com* <https://orcid.org/0000-0003-0607-3334>

⁵*pavelyev10@mail.ru* <https://orcid.org/0000-0003-2803-2138>

⁶*b.a.knyazev@gmail.com* <https://orcid.org/0000-0003-4187-3249>

Abstract

Subject of study. A technique for identifying Hermite–Gaussian and Bessel modes using diffractive optical elements has been investigated in a terahertz range. **The aim of study** is the development and testing of a method for identifying the mode composition of the terahertz radiation beam using binary phase diffraction optical elements for single-mode and multimode cases. **Method.** The proposed approach is based on the correlation filtering method. A beam with a high content of the mode under study was formed using the binary phase diffractive element, and then it illuminated the filter system consisting of the similar element and lens. If the modes, with which the forming and filtering elements were matched, a bright spot in the center, the so-called positive response, was observed. Otherwise, radially symmetrically located petals with a dark spot in the center were observed in the center, which corresponds to a negative response. **Main results.** The experimental results on identification of Hermite–Gaussian modes (with numbers (1, 0) and (0, 1)) and Bessel modes (with topological charge modulus $|l| = 1, 2, 3, 4$) in the case of the single-mode beam are presented. For the case of the multimode beam, a combination of Bessel beams with topological charges -1 and -2 was formed. **Practical significance.** The wireless data transmission at terahertz frequencies (the target frequency range of the next generation of 6G communications) using multimode Bessel beams will allow to significantly increase the information density of transmitted data and to achieve speeds of the order of Tbit/s. The method described in the work can be used for decoding the signals transmitted in a multimode beam.

Keywords: terahertz range, diffractive optics, phase axicon, Bessel beams, Hermite–Gaussian beams, optical vortices

Acknowledgment: the authors express their gratitude to G.N. Kulipanov and N.A. Vinokurov for supporting the work, the free electron laser team for ensuring stable operation of the installation and N.A. Nikolaev for useful recommendations and assistance in reviewing the manuscript. The work was carried out at the shared research center “Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center” on the basis of the unique scientific installation “Novosibirsk FEL” at the BINP SB RAS.

For citation: Osintseva N.D., Gerasimov V.V., Choporova Yu.Yu., Kukotenko V.D., Pavelyev V.S., Knyazev B.A. Identification of Hermite–Gaussian and Bessel modes of terahertz beam with diffractive optical elements [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 4. P. 3–15. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-3-15>

OCIS codes: 050.1380, 070.6110, 140.2600

ВВЕДЕНИЕ

Пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ) [1–3], или оптические вихри, играют большую роль в современной оптике и важны для различных приложений [4–6]. Одним из наиболее перспективных и быстро развивающихся направлений является применение таких пучков в телекоммуникационных системах [7–10]. Поверхность волнового фронта оптических вихрей представляет собой один или множество геликоидов, вращающихся вокруг оси распространения, число которых называется топологическим зарядом l и может принимать значения от ± 1 (где $+$ или $-$ является направлением вращения геликоида) вплоть до нескольких тысяч, например, в работе [11] были получены вихревые пучки $l = 10010$. Наличие ОУМ даёт возможность передавать несколько пучков на одной частоте независимо друг от друга, что позволяет осуществлять мультиплексирование каналов передачи данных [12, 13]. Такие пучки активно исследуются и находят применения в видимом [14–16], инфракрасном [17–20] и радиодиапазонах [8, 21], а также в акустике, например, в ультразвуковом диапазоне [22]. Последней по времени областью электромагнитного спектра, где были получены пучки с ОУМ, является терагерцовый (ТГц) диапазон [23–25].

ТГц диапазон является целевым для шестого поколения систем связи (6G). Использование частот ТГц диапазона позволит повысить скорость [26, 27] и уровень сигнала благодаря большой полосе пропускания и генерации направленных лучей. Поэтому ожидается, что объединение этих двух технологий, а именно формирование ТГц пучков с ОУМ, будет весьма перспективным в сфере связи будущего поколения. Целью данной работы являлись раз-

работка и апробация метода идентификации модового состава пучка излучения терагерцового диапазона с помощью бинарных фазовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ) для одномодового и многомодового случаев.

Формирование оптических вихрей, например в видимом диапазоне, чаще всего осуществляется с применением пространственных модуляторов света на основе жидких кристаллов [28]. Однако коммерчески доступных устройств такого типа для ТГц диапазона не существует. Более того их применение требовало бы высокого ослабления в случае применения высоко-мощного терагерцового излучения гиротронов [29, 30] или лазеров на свободных электронах [31, 32]. На данном этапе развития ТГц детекторов требуется работать с мощными пучками, чтобы получать профили интенсивности в реальном времени. Одним из подходящих способов формирования интенсивных ТГц вихрей является использование дифракционных оптических элементов. В наших предыдущих работах достаточно полно было изложено описание изготовления и применения различных ДОЭ [33, 34] для управления поперечно-модовым составом мощного ТГц пучка излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ), в том числе, для формирования мод Бесселя [35, 36], которые представлены в данной статье.

Повышение ёмкости каналов связи за счёт модового мультиплексирования пучков с ОУМ требует решения и обратной задачи — демultipлексирования [37–40]. В данной работе был предложен и экспериментально апробирован подход идентификации мод Эрмита–Гаусса (ЭГ) и Бесселя в терагерцовом пучке с помощью системы из кремниевого бинарного фазового

ДОЭ и линзы. Подход основан на методе модовой селекции и ранее был использован для анализа модового состава когерентных пучков оптического диапазона [41]. Процесс такой фильтрации сводится к корреляции между неизвестным и заранее определённым сигналом. В результате чего, мы наблюдаем положительный (светлое пятно в центре дифракционной картины) или отрицательный (радиально-симметрично расположенные лепестки с тёмным пятном в центре) отклик. Предварительно подход был апробирован для идентификации Эрмит–Гауссовых мод в терагерцовом пучке (были выбраны моды ЭГ с номерами (1, 0) и (0, 1)), далее подход был перенесён на случай бесселевых пучков, сформированных с помощью бинарных аксиконов [35].

ФОРМИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ЭРМИТ–ГАУССОВЫХ МОД

Терагерцовые эрмит–гауссовы пучки формировались с помощью кремниевых фазовых би-

нарных моданов. Расчёты и изготовление данных элементов были показаны в статье [36], фазовые маски которых представлены на рис. 1 (чёрная область — фаза 0, белая — π). Моданы — класс дифракционных оптических элементов, предназначенный для формирования поперечно-модового состава лазерного излучения [42]. В результате смещения одной половины элемента на π относительно другой наблюдается распределение интенсивности, представленное в нижней части рис. 1. Во всех представленных экспериментах здесь и далее в качестве исходного использовалось ТГц квазимонохроматическое линейно-поляризованное излучение НЛСЭ с рабочей длиной волны $\lambda = 141$ мкм и длительностью импульса $t = 100$ пс при частоте повторения 5,6 МГц. Значение модового радиуса Гауссова пучка в плоскости установки ДОЭ составляло $w = 12,1$ мм.

Формирование и идентификация ЭГ моды осуществлялось в экспериментальной схеме, представленной на рис. 1. Для идентификации

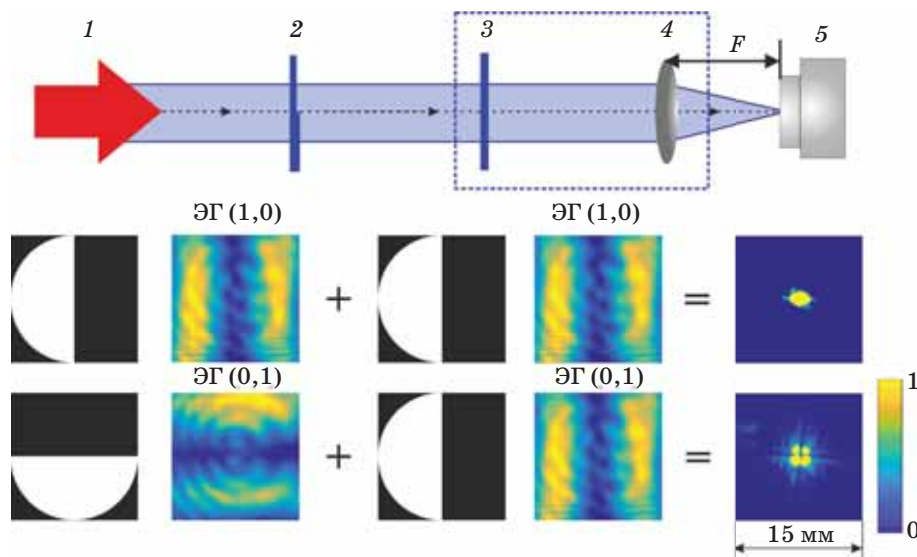


Рис. 1. Схема эксперимента по идентификации ЭГ моды в ТГц пучке (первая строка): 1 — ТГц пучок, 2, 3 — моданы, 4 — кремниевая линза с $F = 100$ мм, 5 — детектор (матрица микроболометрических приёмников), пунктирной рамкой выделена фильтрующая система. Фазовые маски бинарных моданов, экспериментальные распределения интенсивности ЭГ пучков с (1, 0) и (0, 1), справа результаты модовой идентификации в случае положительного и отрицательного откликов, вторая и третья строки, соответственно (каждый кадр нормирован на максимум интенсивности)

Fig. 1. Experimental scheme for identifying the HG mode in a THz beam (first line): 1 — THz beam, 2, 3 — modans, 4 — silicon lens with $F = 100$ mm, 5 — detector (microbolometer array), the filter system is in a dotted frame. Phase masks of binary modans, experimental intensity distributions of HG beams with (1, 0) and (0, 1), on the right the results of mode identification in the case of positive and negative responses are indicated, second and third rows, respectively (each frame is normalized to maximum intensity)

моды использовалась фильтрующая система из ДОЭ, согласованного с исследуемой модой, и линзы (рис. 1, пунктирная рамка). Если пучок падает на фильтр, функция пропускания которого является согласованной по отношению к комплексной амплитуде в сечении пучка, то в фокальной плоскости линзы на оптической оси наблюдается пик интенсивности (положительный отклик). Сформированный ЭГ пучок освещал данную систему, в результате в фокальной плоскости линзы наблюдался положительный или отрицательный отклик (рис. 1, вторая и третья строки, соответственно). Как видно на рис. 1 во второй строке справа, при совпадении ориентации в плоскости установки формирующего и фильтрующего ДОЭ в выходной плоскости наблюдается максимум интенсивности в центре. Такой результат будет справедлив и в случае, когда чёрная и белая области элемента, зеркально отражены. В случае формирования моды, отличной от моды, с которой согласован фильтр, в выходной плоскости наблюдается набор пятен, что соответствует моде Эрмита–Гаусса (1, 1). Данный эффект связан с тем, что если формирующий и фильтрующий ДОЭ повернуты относительно друг друга на 90 градусов, то они делят сечение пучка на квадранты, в каждом из которых свое значение фазы. В нашем случае фаза совпадает для диагонально расположенных квадрантов и отличается на π для

соседних. Вследствие этого на линиях, делящих пучок на квадранты, фаза не определена и в центре возникает минимум интенсивности.

ОДНОМODOVЫЕ ВИХРЕВЫЕ БЕССЕЛЕВЫ ПУЧКИ

В процессе детектирования бesselевых пучков с разными ОУМ, возникает проблема определения величины и знака топологического заряда l . По поперечному распределению интенсивности пучка нельзя определить распределение фазы, а, следовательно, нельзя сделать вывод о направлении вращения вихря. Размер кольца поперечного профиля интенсивности пучка Бесселя также не является точным показателем величины топологического заряда. Аналогично схеме на рис. 1 для идентификации бesselевой моды применялся тот же подход, исключением являлись ДОЭ, использованные в эксперименте, которые в данном случае представляют собой кремниевые фазовые бинарные аксиконы [43] со спиралевидным рельефом и периодом $p = 3,01$ мм (рис. 2).

На рис. 2 представлена экспериментальная схема фильтрации с аксиконами в качестве дифракционных оптических элементов, формирующих бesselеву моду. Формирование кольцевого поперечного распределения интенсивности пучка, описываемого функцией Бесселя первого рода с порядком, соответствующим топологическому заряду аксикона, происходит

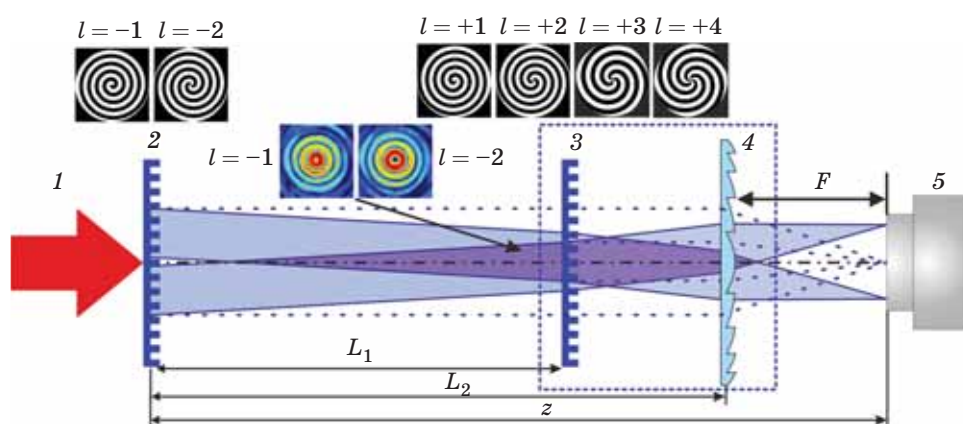


Рис. 2. Экспериментальная схема идентификации бesselевой моды с использованием бинарных аксиконов: 1 — ТГц пучок, 2, 3 — бинарные фазовые аксиконы ДОЭ₁ и ДОЭ₂, 4 — полипропиленовая линза с $F = 75$ мм, 5 — детектор (пирозлектрическая камера Pyrocam IV), пунктирной рамкой выделена фильтрующая система. Расстояния $L_1 = 180$ мм, $L_2 = 285$ мм

Fig. 2. Experimental scheme for identifying the Bessel mode using binary axicons: 1 — THz beam, 2, 3 — binary phase axicons DOE₁ and DOE₂, 4 — polypropylene lens with $F = 75$ mm, 5 — detector (pyroelectric camera Pyrocam IV), the filter system is in a dotted frame system. Distances: $L_1 = 180$ mm, $L_2 = 285$ mm

в результате конструктивной интерференции конически сходящихся плоских волн. В данном случае фильтрующий элемент (ДОЭ₂) располагался в зоне формирования бесселева пучка (100–340 мм для $l = -1, -2$), где распределение интенсивности в поперечном сечении остаётся неизменным (зона «бездифракционности»), на расстоянии $L_1 = 180$ мм. Формируемая мода соответствовала пучкам с топологическими зарядами -1 и -2 . Изображения пучков в плоскости $L_1 = 180$ мм, освещающих ДОЭ₂, представлены цветными вставками на рис. 2. В качестве ДОЭ₂ использовались аксиконы, аналогичные ДОЭ₁, формирующим пучки с $|l| = 1, 2, 3, 4$.

В результате эксперимента были получены следующие результаты (рис. 3): в фокальной плоскости линзы в случае совпадения формирующего и фильтрующего ДОЭ ((б), (г)), наблюдается положительный отклик, который пред-

ставляет собой светлое пятно в центре полученного изображения. В обратном же случае картина отличается и в центре наблюдается тёмное пятно, окружённое радиально-симметричными лепестками. Важно отметить, что в случае бесселевого пучка, образованного бинарным аксиконом, наблюдаются особенности, которые содержат дополнительную информацию об идентификации. Дуги, образующие кольца вокруг центрального пика и являющиеся фурье-образом бесселева пучка (рис. 3д, 3е, 3ж, 3з), становятся неразличимы при отрицательном отклике и различимы при положительном, как и в случае фурье-образа бесселева пучка, сформированного одним ДОЭ [35, 44]. Количество дуг зависит от величины топологического заряда как $2l$, а направление — от знака. В случае формирования и анализа мод Эрмита–Гаусса подобного эффекта не наблюдается.

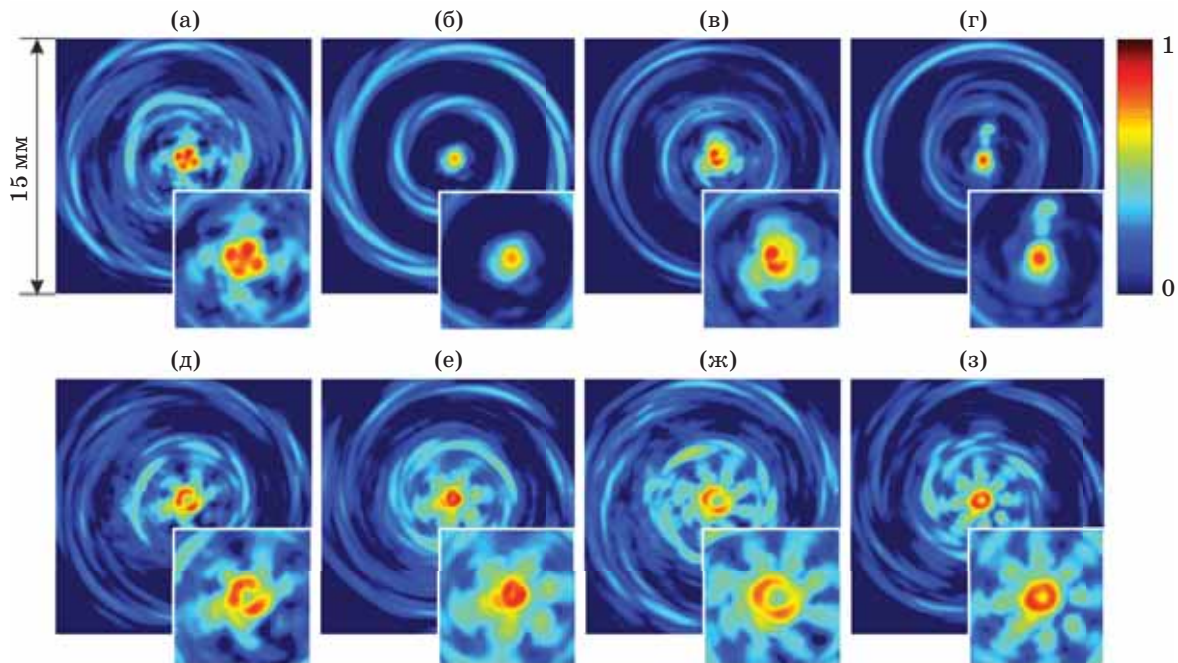


Рис. 3. Экспериментально наблюдаемое распределение интенсивности поля после фильтрации бинарными аксиконом с $|l_{\text{ДОЭ}2}| = 1, 2, 3, 4$ пучков сформированных аналогичными аксиконом $l_{\text{ДОЭ}1} = -1$ и $l_{\text{ДОЭ}1} = -2$: (а) $l_{\text{ДОЭ}1} = -2, l_{\text{ДОЭ}2} = +2$; (б) $l_{\text{ДОЭ}1} = -2, l_{\text{ДОЭ}2} = -2$; (в) $l_{\text{ДОЭ}1} = -1, l_{\text{ДОЭ}2} = +1$; (г) $l_{\text{ДОЭ}1} = -1, l_{\text{ДОЭ}2} = -1$; (д) $l_{\text{ДОЭ}1} = -1, l_{\text{ДОЭ}2} = +3$; (е) $l_{\text{ДОЭ}1} = -1, l_{\text{ДОЭ}2} = -3$; (ж) $l_{\text{ДОЭ}1} = -1, l_{\text{ДОЭ}2} = +4$; (з) $l_{\text{ДОЭ}1} = -1, l_{\text{ДОЭ}2} = -4$. Детектор: Pyrocam IV, размер изображения: $15 \times 15 \text{ мм}^2$, врезки — $4 \times 4 \text{ мм}^2$ (увеличение в 2 раза). Каждый кадр нормирован на максимум интенсивности

Fig. 3. Experimentally observed field intensity distribution after filtering by binary axicons with $|l| = 1, 2, 3, 4$ of beams formed by similar axicons with $l_{\text{DOE}1} = -1$ and $l_{\text{DOE}1} = -2$: (а) $l_{\text{DOE}1} = -2, l_{\text{DOE}2} = +2$; (б) $l_{\text{DOE}1} = -2, l_{\text{DOE}2} = -2$; (в) $l_{\text{DOE}1} = -1, l_{\text{DOE}2} = +1$; (г) $l_{\text{DOE}1} = -1, l_{\text{DOE}2} = -1$; (д) $l_{\text{DOE}1} = -1, l_{\text{DOE}2} = +3$; (е) $l_{\text{DOE}1} = -1, l_{\text{DOE}2} = -3$; (ж) $l_{\text{DOE}1} = -1, l_{\text{DOE}2} = +4$; (з) $l_{\text{DOE}1} = -1, l_{\text{DOE}2} = -4$. Detector: Pyrocam IV, image size: $15 \times 15 \text{ мм}^2$, insets — $4 \times 4 \text{ мм}^2$ (2x increase). Each frame is normalized to maximum intensity

ОБРАТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОДНОМОДОВОГО ВИХРЕВОГО БЕССЕЛЕВА ПУЧКА В КВАЗИГАУССОВ ПУЧОК

«Квазиположительный» отклик наблюдается в случае, совпадающего по модулю, но отличающегося по знаку, топологического заряда, формирующего моду и фильтрующего аксикона [45]. Такой результат возможен, когда

расстояние между формирующим и фильтрующим аксиконами больше длины зоны формирования бесселева пучка. Тогда конически сходящиеся пучки, идущие с противоположных сторон, относительно оптической оси первого аксикона, пересекают оптическую ось и преломляются на втором аксиконе в обратном направлении. Таким образом, конически расходящиеся лучи, проходя через

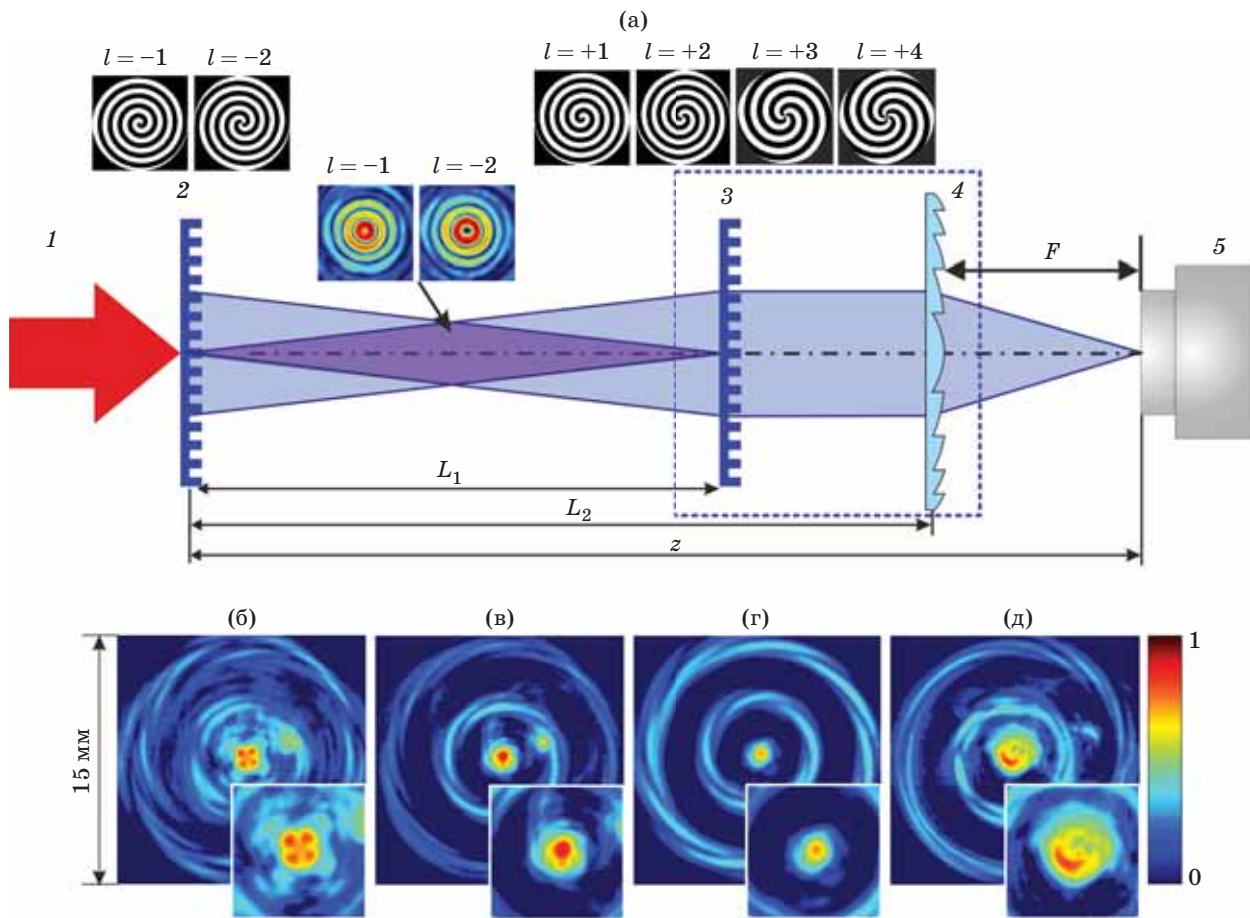


Рис. 4. (а) Экспериментальная схема обратного преобразования бесселевого пучка в квази-гауссов пучок с использованием бинарных аксиконов: 1 — ТГц пучок, 2, 3 — бинарные фазовые аксиконы ДОЭ₁ и ДОЭ₂, 4 — полипропиленовая линза с $F = 75$ мм, 5 — детектор (пироэлектрическая камера Pyrocam IV), пунктирной рамкой выделена фильтрующая система; экспериментально наблюдаемое распределение интенсивности поля после фильтрации бинарными аксиконами с $DOE_2 = \pm 2$ пучка, сформированного аналогичным аксиконом с $DOE_1 = +2$ на расстояниях $L_1 = 180$ мм и $L_1 = 360$ мм ($L_2 = 285$ мм и $L_2 = 465$ мм, соответственно): (б) $l_{DOE1} = +2$, $l_{DOE2} = -2$, $z = z_{max}/2$; (в) $l_{DOE1} = +2$, $l_{DOE2} = -2$, $z = z_{max}$; (г) $l_{DOE1} = +2$, $l_{DOE2} = +2$, $z = z_{max}/2$; (д) $l_{DOE1} = +2$, $l_{DOE2} = +2$, $z = z_{max}$. Каждый кадр нормирован на максимум интенсивности.

Fig. 4. (a) Experimental scheme for back conversion of a Bessel mode into a quasi-Gaussian beam using binary axicons: 1 — THz beam, 2, 3 — binary phase axicons DOE_1 and DOE_2 , 4 — polypropylene lens with $F = 75$ mm, 5 — detector (pyroelectric camera Pyrocam IV), the filter system is in a dotted frame; experimentally observed field intensity distribution after filtering by binary axicons with $DOE_2 = \pm 2$ of beams formed by a similar axicon with $l_{DOE1} = +2$ at distances $L_1 = 180$ mm and $L_1 = 360$ mm ($L_2 = 285$ mm и $L_2 = 465$ mm, respectively): (б) $l_{DOE1} = +2$, $l_{DOE2} = -2$, $z = z_{max}/2$; (в) $l_{DOE1} = +2$, $l_{DOE2} = -2$, $z = z_{max}$; (г) $l_{DOE1} = +2$, $l_{DOE2} = +2$, $z = z_{max}/2$; (д) $l_{DOE1} = +2$, $l_{DOE2} = +2$, $z = z_{max}$. Each frame is normalized to maximum intensity

фильтрующий аксикон, вновь приобретают плоский волновой фронт, образуя квазигансовую моду. В данном случае анализ происходит не вблизи исследуемого элемента, а за пределами зоны формирования бesselевых пучков, однако такое обратное преобразование пучка также несёт информацию о пучке моды Бесселя.

В отличие от работы [45] в наших экспериментах использовались бинарные аксиконы, которые формируют менее чистые по модовому составу бesselевы пучки. В нашем случае в формирование бesselева пучка вносит вклад формирование гауссовой моды нулевого порядка, которая образуется в результате френелевских отражений в кремнии, более подробно об этом эффекте описано в [2]. Оптимальное расстояние формирования бesselева пучка после первого аксикона в нашем случае вычисляется по формуле $z_{\max} \approx Rp/\lambda$, где R — радиус пучка на выходе из первого аксикона. В нижней строке рис. 4 представлены результаты для схемы, приведённой в верхней строке, в которой спиральные аксиконы $|l_{\text{ДОЕ}2}| = 2$, имеющие период $p = 3,01$ мм, располагались на расстояниях $z_{\max} \approx 360$ мм и $z_{\max}/2 = 180$ мм.

МНОГОМОДОВЫЕ ВИХРЕВЫЕ БЕССЕЛЕВЫ ПУЧКИ

Потенциальное применение бesselевых пучков для телекоммуникации предусматривает передачу большого количества каналов данных, каждому из которых соответствует свой топологический заряд [46]. В таком случае для кодировки требуется уметь мультиплексировать несколько пучков с разными закрученностями в одном, а также демультимплексировать после передачи данных, сохранив изначальную информацию.

На рис. 5 приведена схема экспериментальной установки для комбинирования и идентификации пучков с разными ОУМ. Для формирования суперпозиции бesselевых пучков разных порядков использовалась интерферометрическая схема Маха–Цендера. На выходе интерферометра формировался вихревой пучок с комбинацией топологических зарядов $l = -1$ (ДОЭ₁) и $l = -2$ (ДОЭ₂). Пучки формировались в плечах интерферометра с помощью бинарных аксиконов аналогично одномодовому случаю. Выбор элементов для формирования пучков был обусловлен тем, что только для создания таких вихрей мы имели пары идентичных аксиконов и могли проводить

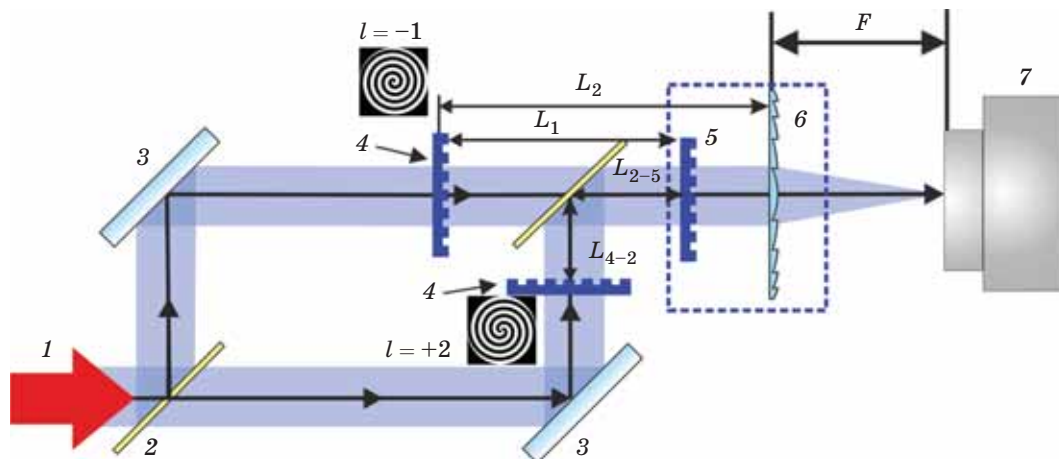


Рис. 5. Экспериментальная схема для формирования вихревого пучка с суперпозицией ОУМ -1 и -2 в интерферометрической схеме Маха–Цендера и модовой идентификации: 1 — ТГц пучок, 2 — плёночные светоделители, 3 — плоские зеркала, 4, 5 — бинарные фазовые аксиконы ДОЭ₁, ДОЭ₂, ДОЭ₃, 6 — полипропиленовая линза с $F = 75$ мм, 7 — детектор (пироэлектрическая камера Pyrocam IV), пунктирной рамкой выделена фильтрующая система. Расстояния: $L_{4-2} + L_{2-5} = L_1 = 180$ мм, $L_2 = 270$ мм

Fig. 5. Experimental scheme for the formation of a vortex beam with a superposition of OAM -1 and -2 in the Mach–Zehnder interferometric scheme and mode identification: 1 — THz beam, 2 — film beam splitters, 3 — flat mirrors, 4, 5 — binary phase axicons DOE₁, DOE₂, DOE₃, 6 — polypropylene lens with $F = 75$ mm, 7 — detector (pyroelectric camera Pyrocam IV), the filter system is highlighted with a dotted frame. Distances:

$$L_{4-2} + L_{2-5} = L_1 = 180 \text{ mm}, L_2 = 270 \text{ mm}$$

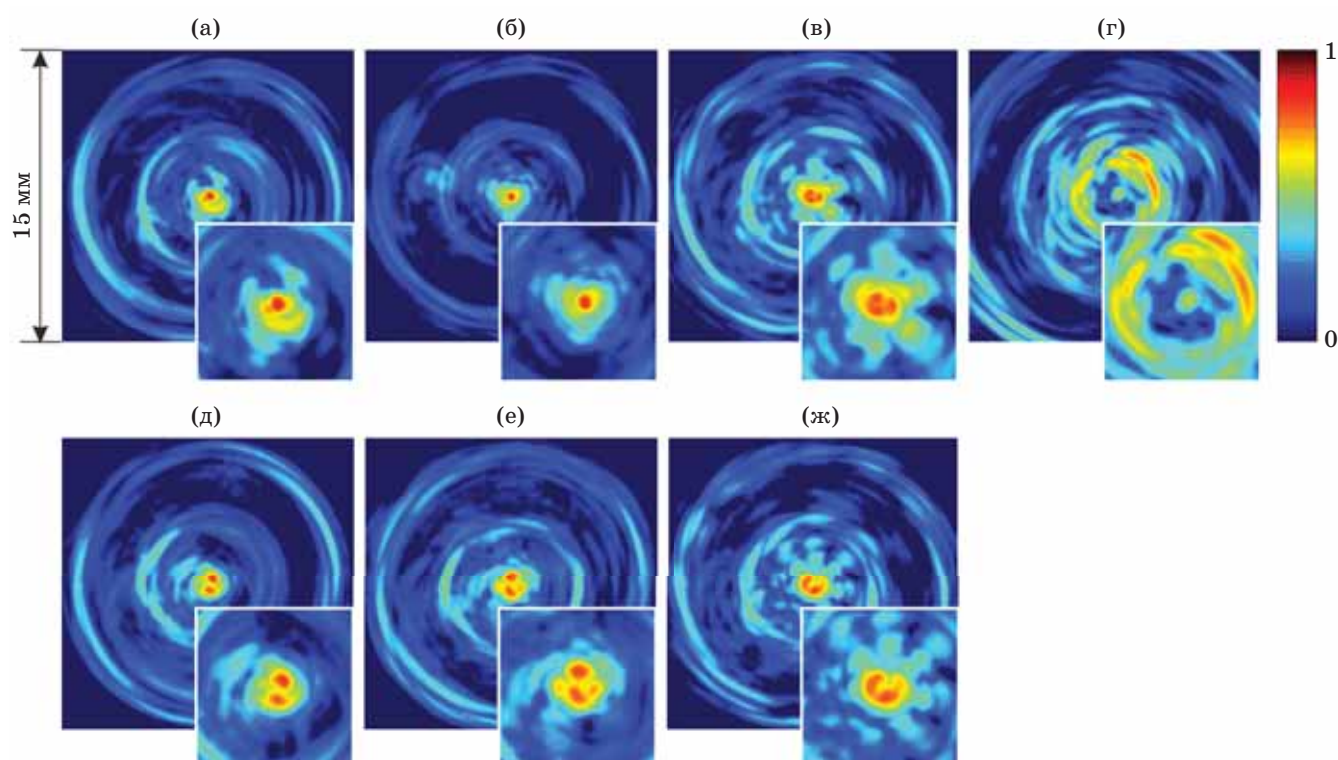


Рис. 6. Экспериментальные результаты модовой идентификации вихревого пучка бesselовой моды с комбинацией топологических зарядов -1 и -2 , аксиконами $l_{\text{ДОЭЗ}} = \pm 1, \pm 2, -3, -4$ с $p = 3,01$ мм и $2,03$ мм в оптической схеме интерферометра Маха–Цендера: (а) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -1$; (б) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -2$; (в) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -3$; (д) $l_{\text{ДОЭЗ}} = +1$; (е) $l_{\text{ДОЭЗ}} = +2$; (ж) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -4$; (г) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -3$ с $p = 2,03$ мм. Каждый кадр нормирован на максимум интенсивности

Fig. 6. Experimental results of mode identification of Bessel mode vortex beam with a combination of topological charges -1 and -2 , axicons $l_{\text{ДОЭЗ}} = \pm 1, \pm 2, -3, -4$ with $p = 3.01$ mm and 2.03 mm in optical scheme of the Mach–Zehnder interferometer: (a) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -1$; (б) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -2$; (в) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -3$; (г) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -3$; (д) $l_{\text{ДОЭЗ}} = +1$; (е) $l_{\text{ДОЭЗ}} = +2$; (ж) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -4$; (г) $l_{\text{ДОЭЗ}} = -3$ with $p = 2.03$ mm. Each frame is normalized to maximum

исследования модовой идентификации. После объединения пучков на выходном светоделителе регистрировалась комбинация пучков с отличными друг от друга топологическими зарядами. Стоит отметить, что для формирования пучка с комбинацией топологических зарядов $l = -1$ и $l = -2$ ДОЭ₂ устанавливался как для создания пучка с $l = +2$, так как при отражении от выходного делителя вихревой пучок меняет направление своей закрученности.

Для идентификации моды в комбинированном пучке на выходе интерферометра после делителя D_2 устанавливалась фильтрующая система из аксикона ДОЭ₃ и полипропиленовой киноформной линзы с $F = 75$ мм. Расстояние от формирующего аксикона в каждом из плеч до фильтрующего составляло $L_{4-2} + L_{2-5} = L_1 = 180$ мм, линза в фильтрую-

щей системе устанавливалась на расстоянии 90 мм от ДОЭ₃. По результатам, приведённым на рис. 6, видна зависимость, аналогичная случаю одномодового пучка. При совпадении топологического заряда, фильтрующего аксикона и одного из пучков, формирующих многомодовую волну, замечен пик интенсивности в центре полученного изображения. В обратном случае в центре можно заметить минимум интенсивности, а также лучи, исходящие из центра полученного распределения интенсивности, число которых равно $2l$, где l — топологический заряд фильтрующего аксикона.

Дополнительно к приведённым измерениям в качестве фильтрующего элемента использовался аксикон с периодом $2,03$ мм (рис. 6г), отличным от формирующих пучков ($3,01$ мм). Видно, что полученные распределения совершенно не согласуются с результатами для

случая аксионов с одинаковыми периодами, так как наблюдается пик в центре, а кольца, формирующие фурье-образ пучка сильно размазаны. Полученный результат свидетельствует о необходимости наличия у формирующих и фильтрующих аксионов одинаковых параметров дифракционной решётки, влияющих на угол схождения конических лучей, формирующих бесселевых пучков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен и апробирован метод идентификации мод Эрмит–Гаусса и Бесселя в когерентных пучках терагерцового диапазона с помощью фазовых бинарных дифракционных оптических элементов и линзы. В случае согласования фазы, формирующего и фильтрующего элементов, наблюдается яркое пятно в центре, что является положительным откликом. В случае бесселевой моды важными

условиями применения метода является использование элементов с одинаковыми параметрами как для формирования, так и для детектирования моды, фильтрующий элемент должен располагаться в зоне формирования пучка. Отмечено, что в результате идентификации бесселевой моды при несовпадении формирующей и фильтрующей мод на полученных изображениях наблюдается дифракционная картина, состоящая из ярких лепестков, количество которых равно $2l$ фильтрующего ДОЭ.

Применение оптических элементов, представленных в работе, может позволить решить задачу формирования оптических вихрей и модовой идентификации в пучке, состоящем из комбинации бесселевых пучков с разными ОУМ на одной частоте. Такой метод передачи данных в ТГц диапазоне существенно повысит плотность каналов данных, что позволит увеличить скорость передачи данных до Тбит/с.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C. et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre–Gaussian laser modes // *Phys. Rev. A*. 1992. V. 45. № 11. P. 8185–8189. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185>
2. Князев Б.А., Сербо В.Г. Пучки фотонов с ненулевой проекцией орбитального момента импульса: новые результаты // *Успехи физических наук*. 2018. Т. 188. № 5. С. 508–539. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.02.038306>
3. Shen Y., Wang X., Xie Z. et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities // *Light Sci Appl*. 2019. V. 8. № 1. P. 90. <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0194-2>
4. Yang H., Zheng S., He W. et al. Terahertz orbital angular momentum: Generation, detection and communication // *China Commun*. 2021. V. 18. № 5. P. 131–152. <https://doi.org/10.23919/JCC.2021.05.009>
5. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Karpeev S.V. et al. Bessel beam: Significance and applications – A progressive review // *Micromachines*. 2020. V. 11. № 11. P. 997. <https://doi.org/10.3390/mi11110997>
6. Шкуратова В.А., Костюк Г.К., Петров А.А. и др. Мультиплицирование гауссова пучка многосекторной бинарной фазовой пластиной в скалярные вихревые пучки для лазерной микрообработки // *Оптический журнал*. 2023. Т. 90. № 5. С. 93–103. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-05-93-103>
7. Wang J., Yang J.Y., Fazal I.M. et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing // *Nature Photon*. 2012. V. 6. № 7. P. 488–496. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.138>
8. Tamburini F., Mari E., Sponselli A. et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test // *New J. Phys*. 2012. V. 14. № 3. P. 033001. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/3/033001>

REFERENCES

1. Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C. et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre–Gaussian laser modes // *Phys. Rev. A*. 1992. V. 45. № 11. P. 8185–8189. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185>
2. Knyazev B.A., Serbo V.G. Beams of photons with nonzero projections of orbital angular momenta: new results [in Russian] // *Physics Uspekhi*. 2018. V. 61. № 5. P. 449. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.02.038306>
3. Shen Y., Wang X., Xie Z. et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities // *Light Sci Appl*. 2019. V. 8. № 1. P. 90. <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0194-2>
4. Yang H., Zheng S., He W. et al. Terahertz orbital angular momentum: Generation, detection and communication // *China Commun*. 2021. V. 18. № 5. P. 131–152. <https://doi.org/10.23919/JCC.2021.05.009>
5. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Karpeev S.V. et al. Bessel beam: Significance and applications – A progressive review // *Micromachines*. 2020. V. 11. № 11. P. 997. <https://doi.org/10.3390/mi11110997>
6. Shkuratova V.A., Kostyuk G.K., Petrov A.A. et al. Multiplication of a Gaussian beam by a multisector binary phase plate into scalar vortex beams for laser microprocessing // *J. Opt. Technol*. 2023. V. 90. № 5. P. 282–288. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000282>
7. Wang J., Yang J.Y., Fazal I.M. et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing // *Nature Photon*. 2012. V. 6. № 7. P. 488–496. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.138>
8. Tamburini F., Mari E., Sponselli A. et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test // *New J. Phys*. 2012. V. 14. № 3. P. 033001. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/3/033001>

9. Kabir Md.A., Ahmed K., Hassan M.M. et al. Design a photonic crystal fiber of guiding terahertz orbital angular momentum beams in optical communication // *Optics Communications*. 2020. V. 475. P. 126192. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126192>
10. Kulya M.S., Sokolenko B., Gorodetsky A. et al. Propagation dynamics of ultrabroadband terahertz beams with orbital angular momentum for wireless data transfer // *Broadband Access Communication Technologies XIV*. SPIE. 2020. V. 11307. P. 112–119. <https://doi.org/10.1117/12.2547695>
11. Fickler R., Campbell G., Buchler B. et al. Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10,010 // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2016. V. 113. № 48. P. 13642–13647. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616889113>
12. Zhu L., Wang J. A review of multiple optical vortices generation: methods and applications // *Front. Optoelectron.* 2019. V. 12. № 1. P. 52–68. <https://doi.org/10.1007/s12200-019-0910-9>
13. Liu X., Huang S., Xie W. и др. New topological charge parallel measurement method of optical vortex based on computer-generated holography (Новый метод параллельного измерения топологического заряда в оптических вихрях на основе компьютерной голографии) [на англ. яз.] // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 2. С. 43–51. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-02-43-51>
14. Shen Z., Hu Z.J., Yuan G.H. et al. Visualizing orbital angular momentum of plasmonic vortices // *Opt. Lett.* 2012. V. 37. № 22. P. 4627. <https://doi.org/10.1364/OL.37.004627>
15. Stellinga D., Pietrzyk M.E., Glackin, J.M. et al. An organic vortex laser // *ACS Nano*. 2018. V. 12. № 3. P. 2389–2394. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b07703>
16. Tudor R., Bulzan G.A., Kusko M. et al. Multilevel spiral axicon for high-order Bessel–Gauss beams generation // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. № 3. P. 579. <https://doi.org/10.3390/nano13030579>
17. Zhao L., Jiang X., Wang Z. et al. Broadband achromatic metalens for tunable focused vortex beam generation in the near-infrared range // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. № 20. P. 2765. <https://doi.org/10.3390/nano13202765>
18. Liu J., Gu J., Huang L. et al. Mid-infrared vortex array generation with a tunable singularity in an Er: YAP laser // *Applied Physics Letters*. AIP Publishing, 2023. V. 123. № 2. <https://doi.org/10.1063/5.0158153>
19. Tollkühn M., Ritter P.J., Hanisch D. et al. THz microscopy with Josephson cantilevers for characterization of additive manufactured spiral phase plates // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2023. V. 33. № 5. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3261260>
20. Vogliardi A., Ruffato G., Bonaldo D. et al. Silicon metaoptics for the compact generation of perfect vector beams in the telecom infrared // *Optics Letters*. 2023. V. 48. № 18. P. 4925–4928. <https://doi.org/10.1364/OL.501239>
21. Krenn M., Fickler R., Fink M. et al. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna // *New J. Phys.* 2014. V. 16. № 11. P. 113028. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/113028>
22. Terzi M.E., Tsysar S.A., Yuldashev P.V. et al. Generation of a vortex ultrasonic beam with a phase plate with an angular dependence of the thickness // *Moscow Univ. Phys.* 2017. V. 72. № 1. P. 61–67. <https://doi.org/10.3103/S0027134916050180>
23. He J., Wang X., Hu D. et al. Generation and evolution of the terahertz vortex beam // *Opt. Express*. 2013. V. 21. № 17. P. 20230. <https://doi.org/10.1364/OE.21.020230>
24. Miyamoto K., Suizu K., Akiba T. et al. Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate // *Optics Communications*. 2020. V. 475. P. 126192. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126192>
9. Kabir Md.A., Ahmed K., Hassan M.M. et al. Design a photonic crystal fiber of guiding terahertz orbital angular momentum beams in optical communication // *Optics Communications*. 2020. V. 475. P. 126192. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126192>
10. Kulya M.S., Sokolenko B., Gorodetsky A. et al. Propagation dynamics of ultrabroadband terahertz beams with orbital angular momentum for wireless data transfer // *Broadband Access Communication Technologies XIV*. SPIE. 2020. V. 11307. P. 112–119. <https://doi.org/10.1117/12.2547695>
11. Fickler R., Campbell G., Buchler B. et al. Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10,010 // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2016. V. 113. № 48. P. 13642–13647. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616889113>
12. Zhu L., Wang J. A review of multiple optical vortices generation: methods and applications // *Front. Optoelectron.* 2019. V. 12. № 1. P. 52–68. <https://doi.org/10.1007/s12200-019-0910-9>
13. Liu X., Huang S., Xie W., et al. Topological charge parallel measurement method for optical vortices based on computer-generated holography // *J. Opt. Technol.* 2022. V. 89. № 2. P. 94–100. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000094>
14. Shen Z., Hu Z.J., Yuan G.H. et al. Visualizing orbital angular momentum of plasmonic vortices // *Opt. Lett.* 2012. V. 37. № 22. P. 4627. <https://doi.org/10.1364/OL.37.004627>
15. Stellinga D., Pietrzyk M.E., Glackin, J.M. et al. An organic vortex laser // *ACS Nano*. 2018. V. 12. № 3. P. 2389–2394. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b07703>
16. Tudor R., Bulzan G.A., Kusko M. et al. Multilevel spiral axicon for high-order Bessel–Gauss beams generation // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. № 3. P. 579. <https://doi.org/10.3390/nano13030579>
17. Zhao L., Jiang X., Wang Z. et al. Broadband achromatic metalens for tunable focused vortex beam generation in the near-infrared range // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. № 20. P. 2765. <https://doi.org/10.3390/nano13202765>
18. Liu J., Gu J., Huang L. et al. Mid-infrared vortex array generation with a tunable singularity in an Er: YAP laser // *Applied Physics Letters*. AIP Publishing, 2023. V. 123. № 2. <https://doi.org/10.1063/5.0158153>
19. Tollkühn M., Ritter P.J., Hanisch D. et al. THz microscopy with Josephson cantilevers for characterization of additive manufactured spiral phase plates // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2023. V. 33. № 5. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3261260>
20. Vogliardi A., Ruffato G., Bonaldo D. et al. Silicon metaoptics for the compact generation of perfect vector beams in the telecom infrared // *Optics Letters*. 2023. V. 48. № 18. P. 4925–4928. <https://doi.org/10.1364/OL.501239>
21. Krenn M., Fickler R., Fink M. et al. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna // *New J. Phys.* 2014. V. 16. № 11. P. 113028. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/113028>
22. Terzi M.E., Tsysar S.A., Yuldashev P.V. et al. Generation of a vortex ultrasonic beam with a phase plate with an angular dependence of the thickness // *Moscow Univ. Phys.* 2017. V. 72. № 1. P. 61–67. <https://doi.org/10.3103/S0027134916050180>
23. He J., Wang X., Hu D. et al. Generation and evolution of the terahertz vortex beam // *Opt. Express*. 2013. V. 21. № 17. P. 20230. <https://doi.org/10.1364/OE.21.020230>
24. Miyamoto K., Suizu K., Akiba T. et al. Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate //

- Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. № 26. P. 261104. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/113028>
25. Zhu L., Wei X., Wang J. et al. Experimental demonstration of basic functionalities for 0.1-THz Orbital Angular Momentum (OAM) communications // OFC 2014. San Francisco, California United States. March 9–13, 2014. P. 1–3. <https://doi.org/10.1364/OFC.2014.M3K.7>
26. Chen Z., Ma X., Zhang B. et al. A survey on terahertz communications // China Communications. 2019. V. 16. № 2. P. 1–35. <https://doi.org/10.12676/jcc.2019.02.001>
27. Jia S., Zhang L., Wang S. et al. 2×300 Gbit/s line rate PS-64QAM-OFDM THz photonic-wireless transmission // J. Lightwave Technol. 2020. V. 38. № 17. P. 4715–4721. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2995702>
28. Guan S., Cheng J., Chang S. Recent progress of terahertz spatial light modulators: Materials, principles and applications // Micromachines. 2022. V. 13. № 10. P. 1637. <https://doi.org/10.3390/mi13101637>
29. Glyavin M.Yu. Development and applications of THz gyrotrons // EPJ Web Conf. 2017. V. 149. P. 01008. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714901008>
30. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Yu. Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. № 1. P. 015101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.015101>
31. Shevchenko O.A., Vinokurov N.A., Arbuzov V.S. et al. The Novosibirsk free electron laser facility // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. № 1. P. 020001. <https://doi.org/10.1063/5.0031513>
32. Tan P., Huang J., Liu K. et al. Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications // Sci. China Inf. Sci. 2012. V. 55. № 1. P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11432-011-4515-1>
33. Agafonov A.N., Volodkin B. O., Kaveev A. K. et al. Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation // Optoelectron. Instrument. Proc. 2013. V. 49. № 2. P. 189–195. <https://doi.org/10.3103/S875669901302012X>
34. Pavelyev V., Khonina S., Degtyarev S. et al. Subwavelength diffractive optical elements for generation of terahertz coherent beams with pre-given polarization state // Sensors. 2023. V. 23. № 3. P. 1579. <https://doi.org/10.3390/s23031579>
35. Choporova Yu.Yu., Knyazev B.A., Kulipanov G.N. et al. High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range // Phys. Rev. A. 2017. V. 96. № 2. P. 023846. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.023846>
36. Choporova Y., Knyazev B., Pavelyev V. Holography with high-power CW coherent terahertz source: optical components, imaging, and applications // Light: Advanced Manufacturing. 2022. V. 3. № 3. P. 525–541. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.031>
37. Wei X., Liu C., Zhang Z. et al. Orbit angular momentum encoding at 0.3 THz via 3D printed spiral phase plates // Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies III. SPIE. 2014. V. 9275. P. 260–265. <https://doi.org/10.1117/12.2085083>
38. Volyar A., Bretsko M., Akimova Y. et al. Measurement of the vortex spectrum in a vortex-beam array without cuts and gluing of the wavefront // Optics Letters. Optica Publishing Group. 2018. V. 43. № 22. P. 5635–5638. <https://doi.org/10.1364/OL.43.005635>
39. Volyar A., Bretsko M., Akimova Y. et al. Measurement of the vortex and orbital angular momentum spectra with a single cylindrical lens // Applied optics. Optica Publishing Group. 2019. V. 58. № 21. P. 5748–5755. <https://doi.org/10.1364/AO.58.005748>
- Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. № 26. P. 261104. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/113028>
25. Zhu L., Wei X., Wang J. et al. Experimental demonstration of basic functionalities for 0.1-THz Orbital Angular Momentum (OAM) communications // OFC 2014. San Francisco, California United States. March 9–13, 2014. P. 1–3. <https://doi.org/10.1364/OFC.2014.M3K.7>
26. Chen Z., Ma X., Zhang B. et al. A survey on terahertz communications // China Communications. 2019. V. 16. № 2. P. 1–35. <https://doi.org/10.12676/jcc.2019.02.001>
27. Jia S., Zhang L., Wang S. et al. 2×300 Gbit/s line rate PS-64QAM-OFDM THz photonic-wireless transmission // J. Lightwave Technol. 2020. V. 38. № 17. P. 4715–4721. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2995702>
28. Guan S., Cheng J., Chang S. Recent progress of terahertz spatial light modulators: Materials, principles and applications // Micromachines. 2022. V. 13. № 10. P. 1637. <https://doi.org/10.3390/mi13101637>
29. Glyavin M.Yu. Development and applications of THz gyrotrons // EPJ Web Conf. 2017. V. 149. P. 01008. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714901008>
30. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Yu. Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. № 1. P. 015101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.015101>
31. Shevchenko O.A., Vinokurov N.A., Arbuzov V.S. et al. The Novosibirsk free electron laser facility // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. № 1. P. 020001. <https://doi.org/10.1063/5.0031513>
32. Tan P., Huang J., Liu K. et al. Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications // Sci. China Inf. Sci. 2012. V. 55. № 1. P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11432-011-4515-1>
33. Agafonov A.N., Volodkin B. O., Kaveev A. K. et al. Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation // Optoelectron. Instrument. Proc. 2013. V. 49. № 2. P. 189–195. <https://doi.org/10.3103/S875669901302012X>
34. Pavelyev V., Khonina S., Degtyarev S. et al. Subwavelength diffractive optical elements for generation of terahertz coherent beams with pre-given polarization state // Sensors. 2023. V. 23. № 3. P. 1579. <https://doi.org/10.3390/s23031579>
35. Choporova Yu.Yu., Knyazev B.A., Kulipanov G.N. et al. High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range // Phys. Rev. A. 2017. V. 96. № 2. P. 023846. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.023846>
36. Choporova Y., Knyazev B., Pavelyev V. Holography with high-power CW coherent terahertz source: optical components, imaging, and applications // Light: Advanced Manufacturing. 2022. V. 3. № 3. P. 525–541. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.031>
37. Wei X., Liu C., Zhang Z. et al. Orbit angular momentum encoding at 0.3 THz via 3D printed spiral phase plates // Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies III. SPIE. 2014. V. 9275. P. 260–265. <https://doi.org/10.1117/12.2085083>
38. Volyar A., Bretsko M., Akimova Y. et al. Measurement of the vortex spectrum in a vortex-beam array without cuts and gluing of the wavefront // Optics Letters. Optica Publishing Group. 2018. V. 43. № 22. P. 5635–5638. <https://doi.org/10.1364/OL.43.005635>
39. Volyar A., Bretsko M., Akimova Y. et al. Measurement of the vortex and orbital angular momentum spectra with a single cylindrical lens // Applied optics. Optica Publishing Group. 2019. V. 58. № 21. P. 5748–5755. <https://doi.org/10.1364/AO.58.005748>

40. Воляр А. В., Абрамочкин Е.Г., Егоров Ю.А. и др. Цифровая сортировка пучков Эрмита–Гаусса: анализ спектра мод и топологический заряд возмущенного пучка Лагерра–Гаусса // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44. №. 4. С. 501–509. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-747>
41. Soifer V.A., Golub M.A. Laser beam mode selection by computer generated holograms. Boca Raton: CRC Press, 1994. 78–85 p.
42. Сисакян И.Н., Голуб М.А., Соифер В.А. Моданы – новые элементы компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 1990. № 08. С. 3–64.
43. Volodkin B., Choporova Y., Knyazev B. et al. Fabrication and characterization of diffractive phase plates for forming high-power terahertz vortex beams using free electron laser radiation // Opt Quant Electron. 2016. V. 48. № 4. P. 223. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0496-z>
44. Осинцева Н.Д., Герасимов В.В., Князев Б.А. и др. Терагерцовые Бесселевы и «совершенные» пучки, созданные бинарным аксиконом и аксиконом с непрерывным рельефом // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 3. С. 375–380. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1066>
45. Trichili A., Mhlanga T., Ismail Y. et al. Detection of Bessel beams with digital axicons // Opt. Express. 2014. V. 22. № 14. P. 17553. <https://doi.org/10.1364/OE.22.017553>
46. Abadi M.M., Cox M.A., Alsaigh R.E. et al. A space division multiplexed free-space-optical communication system that can auto-locate and fully self-align with a remote transceiver // Sci Rep. 2019. V. 9. № 1. P. 19687. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55670-1>
40. Volyar A.V., Abramochkin E.G., Egorov Yu.A. et al. Digital sorting of Hermite–Gauss beams: mode spectra and topological charge of a perturbed Laguerre–Gauss beam // Computer Optics. 2020. V. 44. № 4. P. 501–509. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-747>
41. Soifer V.A., Golub M.A. Laser beam mode selection by computer generated holograms. Boca Raton: CRC Press, 1994. 78–85 p.
42. Sisakyan I.N., Golub M.A., Soifer V.A. Modans are new elements of computer optics [in Russian] // Computer Optics. 1990. № 08. P. 3–64.
43. Volodkin B., Choporova Y., Knyazev B. et al. Fabrication and characterization of diffractive phase plates for forming high-power terahertz vortex beams using free electron laser radiation // Opt Quant Electron. 2016. V. 48. № 4. P. 223. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0496-z>
44. Osintseva N.D., Gerasimov V.V., Knyazev B.A. et al. Terahertz Bessel and "perfect" vortex beams generated with a binary axicon and axicon with continuous relief // Computer Optics. 2022. V. 46. № 3. P. 375–380. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1066>
45. Trichili A., Mhlanga T., Ismail Y. et al. Detection of Bessel beams with digital axicons // Opt. Express. 2014. V. 22. № 14. P. 17553. <https://doi.org/10.1364/OE.22.017553>
46. Abadi M.M., Cox M.A., Alsaigh R.E. et al. A space division multiplexed free-space-optical communication system that can auto-locate and fully self-align with a remote transceiver // Sci Rep. 2019. V. 9. № 1. P. 19687. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55670-1>

АВТОРЫ

Наталья Дмитриевна Осинцева — младший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 57192397970; <https://orcid.org/0000-0002-0750-4135>; natalyaosintseva@gmail.com

Василий Валерьевич Герасимов — канд. физ.-мат.наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 7201614471; <https://orcid.org/0000-0003-1282-6005>; v.gerasimov@nsu.ru

Юлия Юрьевна Чопорова — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 36665951600; <https://orcid.org/0000-0003-4043-8114>; yulia.choporova@gmail.com

Валерия Дмитриевна Кукотенко — инженер-исследователь Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 57205025919; <https://orcid.org/0000-0003-0607-3334>; V.D.Kukotenko@inp.nsk.su

Владимир Сергеевич Павельев — доктор физ.-мат. наук, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского университета, Самара, 443086, Россия; Scopus ID: 6602929361; <https://orcid.org/0000-0003-2803-2138>; pavelyev10@mail.ru

Борис Александрович Князев — доктор физ.-мат. наук, профессор, Scopus ID: 7004522176; <https://orcid.org/0000-0003-4187-3249>; b.a.knyazev@gmail.com

AUTHORS

Natalya D. Osintseva — Junior Researcher of the Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 57192397970; <https://orcid.org/0000-0002-0750-4135>; natalyaosintseva@gmail.com

Vasily V. Gerasimov — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 7201614471; <https://orcid.org/0000-0003-1282-6005>; v.gerasimov@nsu.ru

Yulia Yu. Choporova — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 36665951600; <https://orcid.org/0000-0003-4043-8114>; yulia.choporova@gmail.com

Valeriia D. Kukotenko — Research Engineer of the Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 57205025919; <https://orcid.org/0000-0003-0607-3334>; V.D.Kukotenko@inp.nsk.su

Vladimir S. Pavelyev — D.Sci. (Physics and Mathematics), Head of Nanoengineering Department of the Samara National Research University, Samara, 443086, Russia; Scopus ID: 6602929361; <https://orcid.org/0000-0003-2803-2138>; pavelyev10@mail.ru

Boris A. Knyazev — D.Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Scopus ID: 7004522176; <https://orcid.org/0000-0003-4187-3249>; b.a.knyazev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14.11.2023

Одобрена после рецензирования 09.01.2024

Принята к печати 29.02.2024

The article was submitted to the editorial office 14.11.2023

Approved after review 09.01.2024

Accepted for publication 29.02.2024