

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

Н. Д. Осинцева<sup>1\*</sup>, В. В. Герасимов<sup>1,2</sup>, Ю. Ю. Чопорова<sup>1</sup>, В. Д. Кукотенко<sup>1</sup>, В. С. Павельев<sup>3,4</sup>,  
Б. А. Князев<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Самарский университет, Самара, Россия

<sup>4</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

<sup>5</sup> Без аффилиции

Развитие беспроводных телекоммуникационных систем требует дальнейшего повышения скорости передачи информации. Данная задача может быть достигнута переходом в терагерцовый диапазон спектра. Управление модовым составом терагерцовых бесселевых пучков позволит повысить плотность каналов передачи данных за счет модового мультиплексирования, а также обеспечит устойчивость передачи информации, благодаря свойствам «бездифракционности» и «самовосстановления». В данной работе экспериментально продемонстрирована возможность идентификации мод Эрмит-Гаусса (0,1 и 1,0) и Бесселя (топологический заряд  $l=\pm 1\dots\pm 4$ ) в терагерцовом диапазоне с помощью бинарных дифракционных оптических элементов. Приведены результаты для одно- и многомодовых пучков ( $l=-1$  и  $-2$ ). Модовая идентификация также продемонстрирована для бесселевых пучков, искаженных фазовой неоднородной средой. Показана обратная трансформация бесселева пучка в квази-гауссову плоскую волну.

**Ключевые слова:** ТГц-диапазон, Дифракционные оптические элементы, Фазовый аксикон, Бесселевы пучки, Эрмит-гауссовы пучки, Оптические вихри.

**Цитирование:** Осинцева, Н. Д. Идентификация эрмит-гауссовых и бесселевых мод терагерцового пучка с помощью дифракционных оптических элементов / Н. Д. Осинцева, В. В. Герасимов, Ю. Ю. Чопорова, В. Д. Кукотенко, В. С. Павельев, Б. А. Князев // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 375–379.

## Введение

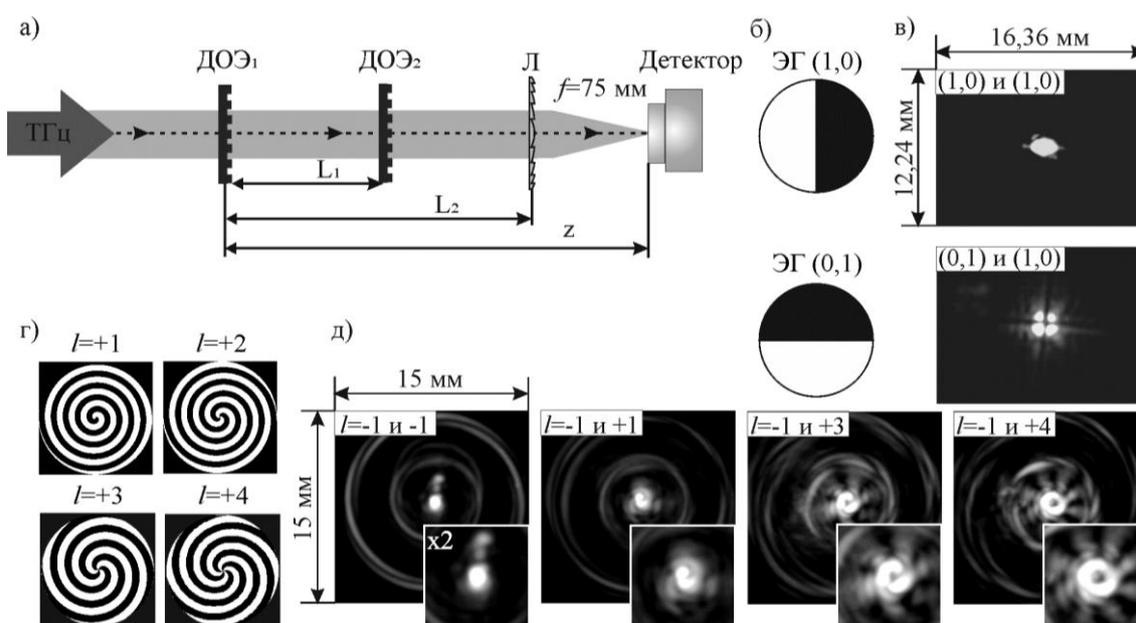
Пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ) [1,2], или оптические вихри, играют большую роль в современной оптике в различных приложениях [3,4]. Наиболее перспективным и развивающимся на данный момент является применение таких волн в телекоммуникационных системах. Поверхность волнового фронта оптических вихрей представляет собой один или несколько геликоидов, вращающихся вокруг направления распространения, число которых называется топологическим зарядом  $l$  и может принимать значения от  $\pm 1$  (где + или – это направление вращения геликоида) вплоть до нескольких сотен. Наличие ОУМ дает возможность передавать несколько пучков на одной частоте независимо друг от друга – мультиплексирование каналов данных [5].

В связи с малой изученностью терагерцового (ТГц) диапазона, методы формирования оптических вихрей в данной области спектра не так хорошо развиты по сравнению, например, с видимым диапазоном, где основным методом является использование жидкокристаллических пространственных модуляторов света [6]. Однако, их применение невозможно, если речь идет о формировании пучков с ОУМ с помощью высокомоощного ТГц излучения гиротронов [7,8] или лазеров на свободных электронах [9,10]. В таком случае подходящим способом является использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ). В наших предыдущих работах было показано изготовление и применение различных ДОЭ для управления поперечно-модовым составом мощного ТГц излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) [11,12], в том числе для формирования бесселевых пучков с ОУМ [13].

Применение модовой мультиплексации требует решения и обратной задачи – декодирования. Необходимо знать модовый состав переданного пучка для расшифровки сигнала [3]. В данной работе был предложен и экспериментально апробирован метод идентификации мод Эрмита-Гаусса и Бесселя с помощью кремниевых бинарных ДОЭ.

### 1. Используемые методы и подходы

Поперечное распределение интенсивности пучка с ОУМ представляет собой набор концентрических колец и не несет информации о величине и знаке топологического заряда  $l$ . Метод идентификации модового состава пучка, предложенный в работе основан на фильтрации пространственного распределения поля с помощью системы из ДОЭ, аналогичного формирующему элементу, и линзы (рис. 1 а).



**Рис. 1.** (а) Схема для идентификации моды в случае одномодового пучка с помощью бинарных ДОЭ; фазовые маски ДОЭ для формирования эрмит-гауссовых (б) и бесселевых пучков с  $l=+1, \dots, +4$ , где черный цвет – 0, белый –  $\pi$ ; экспериментальные результаты идентификации мод Эрмит-Гаусса (в) и Бесселя (д).

В качестве ДОЭ в работе использовались два типа элементов: модан, для формирования и идентификации Эрмит-Гауссовых мод и аксикон, трансформирующий Гауссов пучок НЛСЭ в бесселев. ДОЭ представляют собой кремниевые пластинки с бинарным рельефом, обеспечивающим фазовый сдвиг волнового фронта на  $\pi$  (рис. 1 б, г).

## 2. Результаты

В работе показаны результаты идентификации мод Эрмит-Гаусса (1,0) и (0,1) и Бесселя с топологическими зарядами  $|l|=1, \dots, 4$  (рис. 1 в и д), полученных в результате преобразования ТГц гауссова пучка НЛСЭ. В фокальной плоскости линзы в случае совпадения формирующего и фильтрующего ДОЭ, наблюдается так называемый положительный отклик, который представляет собой пятно с пиком интенсивности в центре, в обратном же случае, картина отличается и состоит из набора пятен вокруг центра с минимумом интенсивности. Важно отметить, что в случае бесселевого пучка, образованного бинарным аксиконом, наблюдаются особенности, позволяющие получить больше информации об идентификации. Дуги, образующие кольца вокруг центрального пика и являющиеся фурье-образом бесселева пучка, становятся неразличимы при отрицательном отклике и различимы при положительном, чего не наблюдается в случае более простой моды Эрмита-Гаусса.

Экспериментально продемонстрирована идентификация бесселевой моды в пучке с комбинацией топологических зарядов -1 и -2 как в свободном пространстве, так и после прохождения фазово-неоднородного препятствия.

## Заключение

Применение бинарных аксиконов, аналогичных используемым для формирования бесселевой моды, и линзы позволят идентифицировать модовый состав комбинированного ТГц пучка. Результаты идентификации, полученные в случае прохождения пучка через фазовое препятствие, демонстрируют возможность декодирования информационного сигнала в условиях неоднородности атмосферы, таких как смог, туман, осадки и т.д. Данный подход может быть применен для построения беспроводных систем квазиоптической связи.

## Благодарность

В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования "Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения" на базе уникальной установки "Новосибирский ЛСЭ" в ИЯФ СО РАН.

## Список источников

- [1] **Allen L.** Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman // Physical review A. — 1992. — Vol 45. — № 1. — P. 8185.
- [2] **Shen Y.** Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen, X. Wang, Z. Xie et. al. // Light: Science & Applications. — 2019. — Vol 8. — № 1. — P. 90.

- [3] **Yang H.** Terahertz orbital angular momentum: Generation, detection and communication / H. Yang, S. Zheng, W. He et. al. // *China Communications*. — 2021. — Vol. 18. — №. 5. — P. 131-152.
- [4] **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. — №. 11. — P. 997.
- [5] **Zhu L.** A review of multiple optical vortices generation: methods and applications / L. Zhu, J. Wang // *Frontiers of Optoelectronics*. — 2019. — Vol. 12. — P. 52-68.
- [6] **Guan S.** Recent progress of terahertz spatial light modulators: materials, principles and applications / S. Guan, J. Cheng, S. Chang // *Micromachines*. — 2022. — Vol. 13. — №. 10. — P. 1637.
- [7] **Glyavin M. Y.** Development and applications of THz gyrotrons / M. Y. Glyavin // *EPJ Web of Conferences*. — EDP Sciences. 2017. — Vol. 149. — P. 01008.
- [8] **Glyavin M. Y.** Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field / M. Y. Glyavin, A. G. Luchinin, G. Y. Golubiatnikov // *Physical review letters*. — 2008. — Vol. 100. — №. 1. — P. 015101.
- [9] **Tan P.** Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications / J. Huang, K. Liu, Y. Xiong, M. Fan // *Science China Information Sciences*. — 2012. — Vol. 55. — P. 1-15.
- [10] **Shevchenko O. A.** The Novosibirsk free electron laser facility / O. A. Shevchenko, N. A. Vinokurov, V. S. Arbutov et. al. // *SYNCHROTRON AND FREE ELECTRON LASER RADIATION: Generation and Application (SFR-2020) AIP Conference Proceedings*. — 2020. — Vol. 2299. — №. 1. — P. 020001. — DOI:10.1063/5.0031513
- [11] **Agafonov A. N.** Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation / A. N. Agafonov, B. O. Volodkin, A. K. Kaveev et. al. // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. — 2013. — Vol. 49. — P. 189-195.
- [12] **Pavelyev V.** Subwavelength Diffractive Optical Elements for Generation of Terahertz Coherent Beams with Pre-Given Polarization State / V. Pavelyev, S. Khonina, S. Degtyarev et. al. // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23. — №. 3. — P. 1579.
- [13] **Choporova Y. Y.** High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range / Yu. Yu. Choporova, B.A. Knyazev, G. N. Kulipanov et. al. // *Physical Review A*. — 2017. — Vol. 96. — №. 2. — P. 023846.

# Hermite-Gaussian and Bessel mode identification of terahertz beam with diffractive optic elements

*N. D. Osintseva<sup>1</sup>, V. V. Gerasimov<sup>1,2</sup>, Yu. Yu. Choporova<sup>1</sup>, V. D. Kukotenko<sup>1</sup>, V. S. Pavelyev<sup>3,4</sup>,  
B. A. Knyazev<sup>5</sup>*

<sup>1</sup> Budker Institute of Nuclear Physics of the SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

<sup>4</sup> Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS, Samara, Russia

<sup>5</sup> Without affiliation

The development of wireless telecommunication systems requires increasing data transmission rate. It can be accomplished by shifting up the carrier frequency to the terahertz range. Controlling the modal composition of directed terahertz beams allows increasing the density of transmitted data channels due to mode multiplexing. At the same time, using the Bessel modes ensures the transmission stability, thanks to the properties of "non-diffraction" and "self-healing" of such beams. This work presents the experimental results of Hermite-Gaussian (0,1 and 1,0) and Bessel (topological charge  $l=\pm 1\dots\pm 4$ ) mode identification by beams of the binary diffractive optical elements in the terahertz range. Experiments were carried out for single-mode and combined beams ( $l=-1$  and  $-2$ ). Moreover, Bessel mode identification was demonstrated for the beams passed through an inhomogeneous medium. The back-conversion of the Bessel beam into a plane quasi-Gaussian beam in the far field was shown.

*Keywords:* THz range, diffractive optical elements, phase axicon, Bessel beams, Hermite-Gaussian beams, vortex beams.