

## Терагерцовые Бесселевы и «совершенные» пучки, созданные бинарным аксиконом и аксиконом с непрерывным рельефом

Н.Д. Осинцева<sup>1,2</sup>, В.В. Герасимов<sup>1,2</sup>, Б.А. Князев<sup>1,2</sup>, М.С. Комленок<sup>3</sup>, В.С. Павельев<sup>1,4</sup>, Д.Е. Яблоков<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 1;

<sup>2</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, д. 11;

<sup>3</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38;

<sup>4</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

<sup>5</sup> ООО «ИнтеллектСофт», 443096, Россия, г. Самара, ул. Мичурина, д. 52

### Аннотация

Проведены сравнительные исследования характеристик Бесселевых и «совершенных» пучков с топологическим зарядом 9, созданных с помощью бинарного кремниевого аксикона и «голографического» алмазного аксикона с непрерывным профилем при значении длины волны 141 мкм на Новосибирском лазере на свободных электронах. Сформированы пучки с линейной, азимутальной и радиальной поляризацией. Проведено сравнение поперечного сечения пучков, созданных разными аксиконами, в зависимости от расстояния. Приведен пример применения совершенных пучков с радиальной поляризацией для возбуждения вихревых плазмон-поляритонов на цилиндрическом проводнике.

**Ключевые слова:** бинарный дифракционный аксикон, аксикон с непрерывным рельефом, терагерцовое излучение, лазер на свободных электронах, поверхностные плазмон-поляритоны.

**Цитирование:** Осинцева, Н.Д. Терагерцовые Бесселевы и «совершенные» пучки, созданные бинарным аксиконом и аксиконом с непрерывным рельефом / Н.Д. Осинцева, В.В. Герасимов, Б.А. Князев, М.С. Комленок, В.С. Павельев, Д.Е. Яблоков // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 3. – С. 375-380. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1066.

**Citation:** Osintseva ND, Gerasimov VV, Knyazev BA, Komlenok MS, Pavelyev VS, Yablokov DE. Terahertz Bessel and “perfect” vortex beams generated with a binary axicon and axicon with continuous relief. Computer Optics 2022; 46(3): 375-380. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1066.

Электрическое поле идеального Бесселева пучка описывается выражением [1]

$$E(\mathbf{r}) = E_0 J_\ell(kr) \exp(ik_z z + i\ell\phi), \quad (1)$$

где  $J_\ell(kr)$  – Бесселева функция первого рода порядка  $\ell$ ,  $k = (k_z^2 + k_\perp^2)^{1/2}$  – волновое число, а  $\phi$  – азимутальный угол. Фурье-спектр Бесселевой волны по поперечным волновым числам

$$a_{k_\perp\ell}(\mathbf{k}_\perp) = i^{-\ell} \exp(i\ell\phi) \frac{2\pi}{k_\perp} \delta(k_\perp - k) \quad (2)$$

представляет собой дельта-функцию в пространстве волновых чисел, а, следовательно, при фокусировке пучка линзой он трансформируется в идеальное кольцо. Пучок вида (1) является в общем случае вихревым пучком (пучком с орбитальным угловым моментом) и имеет распределение интенсивности в поперечном сечении, не зависящее от продольной координаты. Такие пучки представляют интерес для многих приложений. Однако он имеет бесконечное поперечное сечение и бесконечную энергию, а следовательно, в природе не существует. В оптике используются пучки, которые по свойствам близки к Бесселеву пучку, но существуют в ограниченном простран-

стве. Очевидно, что характеристики таких пучков могут зависеть от способов их генерации.

Бесселевы пучки видимого диапазона спектра, их получение и применение описаны, например, в обзоре [2]. Бесселевы пучки в терагерцовом диапазоне частот стали исследоваться в самое последнее время, и сведения о них можно найти в обзоре [3]. Поскольку Бесселевы пучки являются, в сущности, суперпозицией конически сходящихся плоских волн (2), то в первых экспериментах для генерации Бесселевых пучков нулевого порядка использовались конические аксиконы [4] или кольцевые источники света, помещаемые в фокальную плоскость линзы [5, 6]. По мере развития дифракционной оптики [7] для получения Бесселевых пучков стали использовать дифракционные аксиконы [8–11]. Ранее для каждой длины волны требовалось изготовить отдельный дифракционный элемент. В последние годы в связи с прогрессом в разработке коммерчески доступных программно-управляемых пространственных модуляторов света [12], позволяющих оперативно изменять пространственное распределение амплитуды, фазы или поляризации транспарантов для произвольной длины волны, это ограничение для видимого диапазона практически снято.

В терагерцовом диапазоне до сих пор нет доступных пространственных модуляторов света, поэтому создание дифракционных аксиконов для этого диапазона остаётся актуальным. Более того, разработка дифракционных оптических элементов, созданных из стойких к излучению материалов, является критически важным для управления излучением источников большой мощности [13].

В данной работе мы приведем результаты экспериментальных исследований характеристик Бесселевых пучков, созданных с помощью двух типов дифракционных аксиконов, а также сформированных из них с помощью линзы кольцевых пучков, которые принято называть «совершенными» пучками (степень их «совершенства» будет видна из результатов, приведенных ниже). Мы продемонстрируем также генерацию радиально и азимутально поляризованных вихревых пучков, а также приведем пример использования векторных вихревых пучков. Эксперименты выполнены с использованием мощного излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) [14].

Для формирования реальных Бесселевых пучков высших порядков можно использовать четыре типа оптических элементов. На рис. 1 для примера показаны элементы, формирующие пучки с топологическим зарядом  $\ell = +9$ . Аксикон, изображенный на рис. 1а, представляет собой комбинацию классического аксикона и спиральной фазовой пластинки («спиральный аксикон») с фазовой функцией

$$t_{SA}(r, \varphi) = -k\alpha r(n-1) + \ell\varphi = \ell\varphi - kr, \quad (3)$$

где  $n$  – показатель преломления материала. С помощью таких элементов, изготовленных на 3D-принтере, были сформированы Бесселевы пучки в субмиллиметровом диапазоне [15]. Остальные три элемента – дифракционные аксиконы. Первый из них (рис. 1б) является киноформным аналогом спирального аксикона. Его фазовая функция с точностью до скачка фазы  $2\pi$  на границах зон соответствует формуле (3). Оптический элемент с таким распределением фазы был предложен в работе [16].

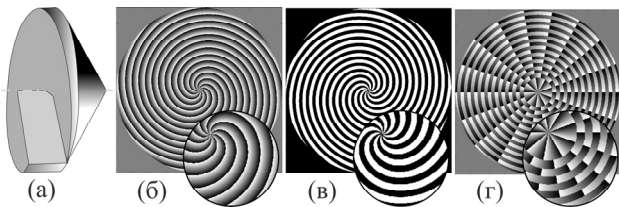


Рис. 1. Классический спиральный аксикон (а) и фазовые функции дифракционных аксиконов (б – киноформный, в – бинарный, г – голографический) для генерации Бесселева пучка девятого порядка при длине волны 141 мкм. Диаметр аксиконов – 50 мм. Фаза показана цветом и растет от  $-\pi/2$  (чёрный цвет) до  $+\pi/2$  (белый цвет) в случае бинарного аксикона и от  $-\pi$  до  $+\pi$  для остальных дифракционных аксиконов. У аксикона 1а фаза по азимуту нарастает от 0 до  $9 \times 2\pi$

Следующий элемент (рис. 1в) является бинарным приближением киноформного аксикона

$$t_{BA}(r, \varphi) = \pi \text{sign}[\sin(\ell\varphi - kr)]/2 \quad (4)$$

с размахом фазы  $\pm\pi/2$  и периодом рельефа  $p = 2\pi/k$ . С помощью бинарного аксикона, изготовленного из высокоомного кремния, были впервые получены Бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом в терагерцовом диапазоне [17].

Элемент, изображенный на рис. 1г, как и киноформный аксикон, является элементом с непрерывным рельефом. Если первые два дифракционных аксикона являются, в сущности, дифракционными решетками, то фазовая функция последнего элемента описывается выражением

$$t_{HA}(r, \varphi) = \ell(\varphi + \pi + \pi H(J_{|\ell|}(kr)/|\ell|)) - 2\pi \text{fix}\left(\frac{\ell(\varphi + \pi + \pi H(J_{|\ell|}(kr)/|\ell|))}{2\pi}\right), \quad (5)$$

где  $H(x)$  – функция Хэвисайда, а  $\text{fix}(y)$  – удаляет дробную часть целого числа. Фазовая функция этого элемента повторяет фазовую функцию Бесселевой волны, и ширина его зон не одинакова. Элементы подобного типа для видимого диапазона исследованы, например, в работах [18–20]. В работах [21, 22] элементы этого типа были использованы для формирования в фокальной плоскости линзы совершенных пучков. Следуя предложенной в этих работах терминологии, мы будем далее называть эти элементы «голографическими аксиконами». В работе [23] выполнены детальные аналитические и численные расчеты Бесселевых пучков и их фурье-спектров, получаемых с тремя типами дифракционных аксиконов.

В данной работе экспериментально исследованы пучки, создаваемые бинарным и голографическим аксиконы. Были исследованы бинарный аксикон из высокоомного кремния диаметром 50 мм с периодом спиральной решетки 2,03 мм и алмазный голографический аксикон, создававшие Бесселевы пучки с поперечным волновым числом  $k = 3,1 \text{ мм}^{-1}$  и топологическим зарядом  $|\ell| = 9$ . Бинарный аксикон был изготовлен с помощью технологии, описанной в [24] и ранее использованной для изготовления бинарных кремниевых аксиконов терагерцового диапазона с топологическими зарядами  $|\ell| = 1, 2$  для экспериментов, описанных в [17]. Голографический аксикон диаметром 20 мм из искусственного алмаза с непрерывным рельефом был изготовлен в Институте общей физики РАН. Метод изготовления и характеристики голографического аксикона будут описаны в отдельной статье. Знак топологического заряда пучка изменялся на противоположный при повороте аксикона на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси.

На рис. 2 показаны снятые с помощью камеры Ругосам IV распределения интенсивности в поперечном

сечении пучков, сформированных аксиконами при их освещении Гауссовым пучком лазера на свободных электронах с модовым радиусом 13 мм. Для корректности сравнения характеристик перед бинарным аксиконом была установлена диафрагма с диаметром отверстия 20 мм. При радиусе пучка на аксиконах  $R=10$  мм область существования Бесселева пучка ограничивается расстоянием  $Z_0=2\pi R/\kappa\lambda \approx 140$  мм [23], после которого сходящиеся плоские волны минус первого порядка дифракции перестают пересекаться. Расстояние, на котором распределение интенсивности пучка ближе всего к идеальному Бесселеву, должно быть при  $Z_0/2 \approx 70$  мм, что и подтверждается экспериментальными данными. Сечения пучков, созданных различными дифракционными аксиконами, отличаются друг от друга не только вдали от  $z=Z_0/2$ , но и в области оптимального пересечения пучков (рис. 3а, б). Первое Бесселево кольцо для бинарного аксикона имеет  $\ell$  (девять) вариаций интенсивности по азимуту, тогда как в случае голографического аксикона их  $2\ell$  (восемнадцать). Видно также, что распределения интенсивности в периферийных кольцах также сильно отличаются.

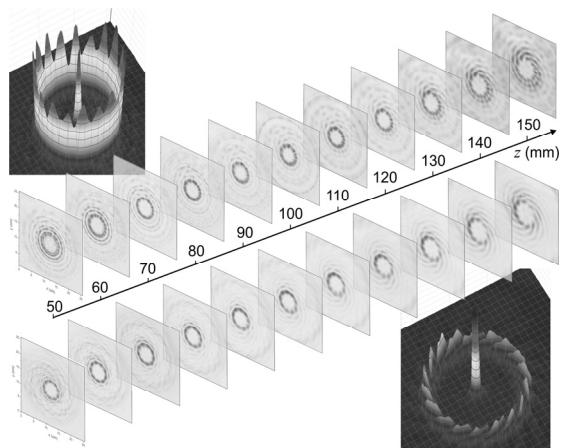


Рис. 2. Поперечные сечения Бесселевых пучков, созданных алмазным аксиконом с непрерывным рельефом (вверху) и бинарным аксиконом (внизу), ограниченных апертурой  $2R=20$  мм, как функция расстояния. Размер кадров –  $25,6 \times 25,6$  мм<sup>2</sup>. Пучок, освещающий аксиконы, линейно поляризован. Врезки: распределение интенсивности этих пучков в фокальной плоскости киноформной полипропиленовой линзы с  $f=75$  мм

Для практических применений большой интерес представляют совершенные пучки. Их средние радиусы для обоих аксиконов одинаковы (и практически не зависят от топологического заряда [23]), но их сечения значительно отличаются. Этот факт отмечался ранее для пучков видимого диапазона. Как видно на рис. 3д, е (и более детально на врезках в рис. 2), оба совершенных пучка имеют 18 вариаций интенсивности по азимуту, но если с голографическим аксиконом мы получаем почти идеальный кольцевой пучок, как при фокусировке идеального Бесселева пучка, то для бинарного аксикона совершенный пучок пред-

ставляет собой более широкое кольцо, состоящее из спиральных отрезков. Аналитические выражения, описывающие расщепление кольца совершенного пучка для аксиконов нулевого и высших порядков, выведены в работах [25] и [23] соответственно. Одним из способов получения идеального кольцевого пучка в видимом диапазоне является также фокусировка с помощью вихревой тороидальной линзы [26].

Для многих приложений необходимы векторные пучки с изменяющимся по сечению поляризационным состоянием. В данной работе мы с помощью сегментной полуволновой пластинки [27], представляющей собой склейку из восьми секторов с главными осями, повернутыми на  $22,5^\circ$  каждый, трансформировали вихревые пучки, созданные обоими исследуемыми аксиконами в пучки с азимутальной и радиальной поляризацией. Бесселевы пучки, имеющие радиальную поляризацию, показаны на рис. 3в, з. Видно, что качество Бесселева пучка несколько ухудшается, причиной чего является влияние склеек между секторами, но еще остается приемлемым. То же можно сказать и про совершенные пучки (рис. 3ж, з).

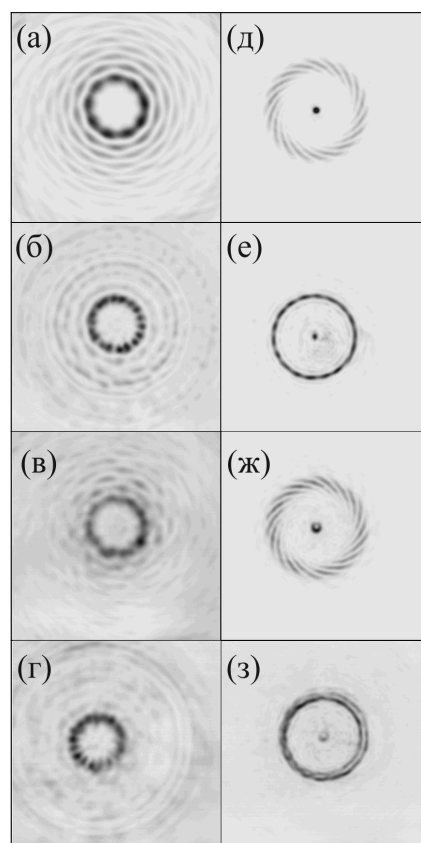


Рис. 3. Сечения Бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом  $\ell = +9$ , созданных бинарным (а, в) и голографическим (б, г) аксиконами на расстоянии 70 мм, записанные с помощью камеры Yucosat IV при длине волны 141 мкм. Справа (д-з): совершенные пучки, сформированные с помощью линзы с фокусным расстоянием 75 мм. Пучки (а, б) получены при освещении аксиконов линейно поляризованным, а (в, г) – радиально поляризованным излучением

Обратим внимание на пики в центре совершенных пучков, которые при теоретических расчетах отсутствуют. Причиной их появления являются Френелевские отражения внутри аксиконов, благодаря которым часть падающего излучения (менее 10%) проходит аксикон без дифракции [17]. Эта более слабая прошедшая волна нулевого порядка накладывается и на изображения Бесселевых пучков (рис. 3а–з), снижая их контрастность, но не проявляясь явно. В случае радиальной поляризации, как и следовало ожидать, эта центральная точка трансформируется в небольшое кольцо с сингулярностью в центре (рис. 3ж, з). Интеграл интенсивности излучения в пределах матрицы детектора падает с расстоянием (рис. 4) одинаково для обоих аксиконов. На расстоянии 160 мм интенсивность падает примерно в два раза, что можно объяснить выходом из апертуры матрицы дифракционных пучков плюс первого порядка, не участвующих в формировании Бесселева пучка. Заметим, что эти пучки, однако, при достаточно большой апертуре линзы могут участвовать в формировании совершенных пучков.

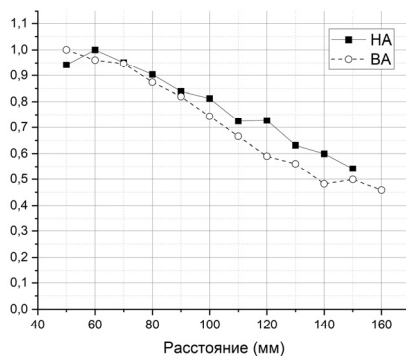


Рис. 4. Интегральная интенсивность излучения (нормированная на максимальное значение) в пределах кадров, показанных на рис. 2, для бинарного (BA) и голографического (HA) аксиконов

Совершенные пучки, сформированные описанными выше аксиконами, использовались для генерации вихревых поверхностных плазмон-поляритонов (ВППП) терагерцового диапазона на осесимметричных проводящих линиях [28], которая показала возможность реализации плазмонных мультиплексных передающих линий, предложенных в [29]. Плазмоны, несущие орбитальный угловой момент с  $|\ell| \pm 9$ , возбуждались методом дифракции (end-fire coupling technique) совершенных пучков, показанных на рис. 3е и 3з, на торце проводящего цилиндра диаметром 10 мм. Хотя возбуждение ВППП пучком, созданным голографическим аксиконом (рис. 3з), представляется энергетически более эффективным, однако сложная структура совершенного пучка, созданного с помощью бинарного аксикона (рис. 3ж), оказалась благоприятным фактором для эксперимента. Она

позволила возбудить на краю цилиндра 18 независимых параллельно движущихся поверхностных плазмон-поляритонов, что дало возможность продемонстрировать (детали см. [28]), что ППП, созданные вихревыми пучками, движутся параллельно по винтовым траекториям и переносят орбитальный угловой момент от возбуждающего пучка свободной волне, излучаемой плазмоном с заднего конца цилиндрической линии. В качестве другого примера практического использования вихревой структуры совершенных пучков можно привести эксперимент в видимом диапазоне [30], в котором с их помощью формировались спиральные наноиглы при лазерной абляции серебряной пленки.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00103) на уникальной установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» с использованием оборудования «Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения». Авторы благодарят О.Э. Камешкова и Ю.Ю. Чопорову за полезные обсуждения, команду НЛСЭ за помощь в эксперименте и К.Н. Тукмакова за изготовление бинарного аксикона.

### References

- [1] Valyaev AB, Krivoslykov SG. Mode properties of Bessel beams. *Sov J Quantum Electron* 198; 19(5): 679-680. DOI: 10.1070/QE1989v019n05ABEH008094.
- [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. *Physics-Uspeski* 2018; 61(5): 449-479. DOI: 10.3367/UFNe.2018.02.038306.
- [4] McLeod JH. The axicon: a new type of optical element. *J Opt Soc Am* 1954; 44(8): 592-597. DOI: 10.1364/JOSA.44.000592.
- [5] Durnin J, Miceli JJ Jr, Eberly JH. Diffraction-free beams. *Phys Rev Lett* 1987; 58(15): 1499-1501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.1499.
- [6] Lin Y, Seka W, Eberly JH, Huang H, Brown, DL. Experimental investigation of Bessel beam characteristics. *Appl Opt* 1992; 31(15): 2708-2713. DOI: 10.1364/AO.31.002708.
- [7] Soifer VA, ed. *Diffraction computer optics*. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2007. ISBN: 5-9221-0845-4.
- [8] Turunen J, Vasara A, Friberg AT. Holographic generation of diffraction-free beams. *Appl Opt* 1988; 27(19): 3959-3962. DOI: 10.1364/AO.27.003959.
- [9] Soifer VA, ed. *Diffraction nanophotonics*. Boca Raton: CRC Press; 2014. ISBN: 978-1-4665-9069-4.
- [10] Khonina SN, Porfirev AP. 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons. *Appl Phys B* 2018; 124(9): 191. DOI: 10.1007/s00340-018-7060-4.
- [11] Khonina SN, Porfirev AP, Volotovskiy SG, Ustinov AV, Fomchenkov SA, Pavelyev VS, Schröter S, Duparré M.

- Generation of multiple vector optical bottle beams. *Photonics* 2021; 8(6): 218. DOI: 10.3390/photonics8060218.
- [12] Neff JA, Athale RA, Lee SH. Two-dimensional spatial light modulators: a tutorial. *Proc IEEE* 1990; 78(5): 826-855. DOI: 10.1109/5.53402.
- [13] Pavelyev VS, Volodkin BO, Tukmakov KN, Knyazev BA, Choporova YY. Transmissive diffractive microoptics for high-power THz laser radiation. *AIP Conf Proc* 2018; 1989(1): 020025. DOI: 10.1063/1.5047701.
- [14] Shevchenko OA, Vinokurov NA, Arbutov VS, Chernov KN, Deichuly OI, Dementyev EN, Dovzhenko BA, Getmanov YV, Gorbachev YI, Knyazev BA, et al. The Novosibirsk free electron laser facility. *AIP Conf Proc* 2020; 2299(1): 020001. DOI: 10.1063/5.0031513.
- [15] 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(36): 10641-10649. DOI: 10.1364/AO.54.010641.
- [16] Khonina SN, Kotlyar YV, Soifer VA, Shinkaryev MV, Uspleniev GV. Trochoson. *Opt Commun* 1992; 91(3-4): 158-162. DOI: 10.1016/0030-4018(92)90430-Y.
- [17] Choporova YuYu, Knyazev BA, Kulipanov GN, Pavelyev VS, Scheglov MA, Vinokurov NA, Volodkin BO, Zhabin VN. High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range. *Phys Rev A* 2017; 96(2): 023846. DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023846.
- [18] Fedotowsky A, Lehovc K. Optimal filter design for annular imaging. *Appl Opt* 1974; 13(12): 2919-2923. DOI: 10.1364/AO.13.002919.
- [19] Skidanov VE, Ganchevskaya SV. Diffractive optical elements for the formation of combinations of vortex beams in the problem manipulation of microobjects. *Computer Optics* 2014; 38(1): 65-71. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-1-65-71.
- [20] Arrizón V, Sánchez-de-la-Llave D, Ruiz U, Méndez G. Efficient generation of an arbitrary nondiffracting Bessel beam employing its phase modulation. *Opt Lett* 2009; 34(9): 1456-1458. DOI: 10.1364/OL.34.001456.
- [21] Ostrovsky AS, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V. Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator. *Opt Lett* 2013; 38(4): 534-536. DOI: 10.1364/OL.38.000534.
- [22] Vaity P, Rusch L. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam. *Opt Lett* 2015; 40(4): 597-600. DOI: 10.1364/OL.40.000597.
- [23] Knyazev BA, Cherkassky VS, Kameshkov OE. “Perfect” terahertz vortex beams formed using diffractive axicons and prospects for excitation of vortex surface plasmon polaritons. *Appl Sci* 2021; 11(2): 717. DOI: 10.3390/app11020717.
- [24] Agafonov AN, Volodkin BO, Kaveev AK, Knyazev BA, Kropotov GI, Pavel'ev VS, Soifer VA, Tukmakov KN, Tsygankova EV, Choporova YuYu. Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2013; 49(2): 189-195. DOI: 10.3103/S875669901302012X.
- [25] Ustinov AV, Porfir'ev AP, Khonina SN. Effect of the fill factor of an annular diffraction grating on the energy distribution in the focal plane. *J Opt Technol* 2017; 84(9): 580-587. DOI: 10.1364/JOT.84.000580.
- [26] THz monochromatic wave plates. Source: [http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz\\_optics/thz\\_waveplate1/](http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_waveplate1/).
- [27] Khonina SN, Kharitonov SI, Volotovskiy SG, Soifer VA. Caustics of non-paraxial perfect optical vortices generated by toroidal vortex lenses. *Photonics* 2021; 8(7): 259. DOI: 10.3390/photonics8070259.
- [28] Gerasimov VV, Kameshkov OE, Knyazev BA, Osintseva ND, Pavelyev VS. Vortex surface plasmon polaritons on a cylindrical waveguide: Generation, propagation, and diffraction. *J Opt* 2021; 23(10): 10LT01. DOI: 10.1088/2040-8986/ac1fc4.
- [29] Knyazev BA, Kameshkov OE, Nikitin AK, Pavelyev VS, Choporova YuYu. Feasibility of generating surface plasmon polaritons with a given orbital momentum on cylindrical waveguides using diffractive optical elements. *Computer Optics* 2019; 43(6): 992-1000. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-992-1000.
- [30] Syubaev S, Zhizhchenko A, Vitrik O, Porfirev A, Fomchenkov S, Khonina S, Kuchmizhak A. Chirality of laser-printed plasmonic nanoneedles tunable by tailoring spiral-shape pulses. *Appl Surf Sci* 2019; 470: 526-534. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.11.128.

### Сведения об авторах

**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).

**Герасимов Василий Валерьевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института ядерной физики 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).

**Князев Борис Александрович**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института ядерной физики 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).

**Комленок Максим Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела светоиндуцированных поверхностных явлений Центра естественно-научных исследований Института общей

физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: лазерная обработка и исследование различных углеродных и кремниевых материалов, спектроскопия и структурная модификация, нанофотоника.

E-mail: [komlenok@nsc.gpi.ru](mailto:komlenok@nsc.gpi.ru).

**Павельев Владимир Сергеевич**, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва; главный научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур.

E-mail: [nano@ssau.ru](mailto:nano@ssau.ru).

**Яблоков Денис Евгеньевич**, окончил аспирантуру Самарского университета по направлению «Информатика и вычислительная техника». Ведущий разработчик в компании «ИнтеллектСофт». Область творческих и научных интересов: технологии программирования, абстракция данных, мультипарадигменное конструирование программного обеспечения, обобщённые алгоритмы и структуры данных.

E-mail: [dyablokov.SSAU@gmail.com](mailto:dyablokov.SSAU@gmail.com).

---

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 6 ноября 2021 г. Окончательный вариант – 16 января 2022 г.

---

---

# Terahertz Bessel and “perfect” vortex beams generated with a binary axicon and axicon with continuous relief

N. D. Osintseva<sup>1,2</sup>, V.V. Gerasimov<sup>1,2</sup>, B.A. Knyazev<sup>1,2</sup>, M.S. Komlenok<sup>3</sup>, V.S. Pavelyev<sup>1,4</sup>, D.E. Yablokov<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup> Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentyeva Ave. 11;

<sup>3</sup> Prokhorov General Physics Institute RAS, 119991, Russia, Moscow, Vavilova St. 38;

<sup>4</sup> Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34;

<sup>5</sup> IntellectSoft, 443096, Samara, Russia, Michurin street 52

## Abstract

Comparative studies of characteristics of Bessel and “perfect” vortex beams with a topological charge 9, created using a binary silicon axicon and a “holographic” diamond axicon with continuous profile at a wavelength of 141  $\mu\text{m}$ , are carried out. Beams with linear and radial polarization are investigated. An example of the use of a perfect radially polarized beam for the excitation of vortex plasmon-polaritons on a cylindrical conductor is given.

**Keywords:** binary diffractive axicon, axicon with continuous relief, terahertz radiation, free electron laser, surface plasmon polaritons.

**Citation:** Osintseva ND, Gerasimov VV, Knyazev BA, Komlenok MS, Pavelyev VS, Yablokov DE. Terahertz Bessel and “perfect” vortex beams generated with a binary axicon and axicon with continuous relief. *Computer Optics* 2022; 46(3): 375-380. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1066.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-12-00103) on a unique setup “Novosibirsk Free Electron Laser” using equipment from the “Siberian Center of Synchrotron and Terahertz Radiation” The authors are grateful to O.E. Kameshkov and Yu.Yu. Choporova for helpful discussions, the NovoFEL team for continuous support of the experiments and K.N. Tukmakov for fabrication of the binary axicon.

---

## Authors' information

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

**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).

**Boris Aleksandrovich Knyazev**, Professor, Doctor in Physics and Math, principal researches 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).

**Maxim Sergeevich Komlenok**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; researcher of Laser Induced Surface Phenomena department, Natural Sciences Center of A.M. Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia. Research interests: laser processing and characterization of different carbon and silicon materials, spectroscopic diagnostics and structure modification, nanophotonics. E-mail: [komlenok@nsc.gpi.ru](mailto:komlenok@nsc.gpi.ru).

**Vladimir Sergeevich Pavelyev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering department of the Samara University, principal researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS, principal researcher of the Research Laboratory of Applied Electrodynamics, Novosibirsk State University. 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).

**Denis Evgenievich Yablokov**, graduated from postgraduate school at Samara University, Information Technology. Lead developer at IntellectSoft. Research interests: programming technology, data abstraction, multi-paradigm software construction, generic algorithms and data structures. E-mail: [dyablokov.SSAU@gmail.com](mailto:dyablokov.SSAU@gmail.com).

---

Received November 06, 2021. The final version – January 16, 2022.

---