

## Оптимизация параметров бинарных фазовых аксиконов для генерации терагерцовых закрученных поверхностных плазмон-поляритонов на цилиндрических проводниках

Б.А. Князев<sup>1,2</sup>, В.С. Павельев<sup>1,3,4</sup>

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

<sup>2</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера,  
630090, Россия, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Лаврентьева, д. 11,

<sup>3</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

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

### Аннотация

Рассмотрена возможность генерации поверхностных плазмон-поляритонов с орбитальным угловым моментом («закрученных плазмонов») на цилиндрических проводниках дифракционным методом ("end-fire coupling technique") в спектральном диапазоне от 8,5 до 141 мкм (~2–40 ТГц). Торец цилиндра освещается Бесселевыми пучками, сформированными с помощью бинарных спиральных фазовых аксиконов, или кольцевыми закрученными пучками, сформированными в фокальной плоскости дополнительной линзы. Построены графики, определяющие связь между параметрами волновода (диаметр проводника, равный диаметру освещающего пучка, и угол «закрутки» плазмона) и параметрами аксикона (отношение периода аксикона к длине волны излучения) для указанных выше длин волн и топологических зарядов пучков от 1 до 9. Полученные результаты свидетельствуют о возможности проведения в длинноволновом диапазоне экспериментов по моделированию плазмонного мультиплексного канала связи.

**Ключевые слова:** поверхностный плазмон-поляритон, бинарный фазовый аксикон, закрученные пучки.

**Цитирование:** Князев, Б.А. Оптимизация параметров бинарных фазовых аксиконов для генерации терагерцовых закрученных поверхностных плазмон-поляритонов на цилиндрических проводниках / Б.А. Князев, В.С. Павельев // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 852-856. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-726.

**Citation:** Knyazev BA, Pavelyev VS. Optimization of parameters of binary phase axicons for the generation of terahertz vortex surface plasmons on cylindrical conductors. Computer Optics 2020; 44(5): 852-856. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-726.

### Введение

Известно, что комбинацию пучков с орбитальным угловым моментом («закрученных» пучков), распространяющихся в свободном пространстве, можно использовать для создания мультиплексного коммуникационного канала передачи данных [1, 2]. Такая возможность была продемонстрирована экспериментально в видимом [3], радиочастотном [4] и миллиметровом [5] диапазонах. При распространении в свободном пространстве дополнительным преимуществом закрученных пучков является их способность к самовосстановлению при прохождении через случайно-неоднородные среды и препятствия [6–8], в том числе и в терагерцовом диапазоне [9]. При решении технологических задач для коммуникационных систем в свободном пространстве большую роль играют дифракционные оптические элементы (аксиконы, поляризаторы, моданы), которые позволяют формировать пучки нужного модового состава, пространственного распределения и заданной поляризации, а

также позволяют кодировать и декодировать комплексные сигналы [7, 10–11].

Можно предположить, что аналогичным образом можно создать и плазмонные коммуникационные системы, передавая информацию по цилиндрическим проводникам с помощью комбинации поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), вектор Пойнтинга которых имеет, кроме основной аксиальной составляющей, заданную азимутальную составляющую, иными словами, с помощью ППП, несущих орбитальный угловой момент (ОУМ). Для подтверждения или опровержения этого предположения необходимо провести эксперименты, которые должны подтвердить возможность генерации закрученных плазмонов, продемонстрировать сохранение их орбитального момента в процессе распространения, а также показать возможность декодирования сигнала.

Поскольку длина пробега поверхностных плазмонов видимого диапазона равна лишь десяткам микронов (см., например, обзор [12]), плазмонные мультиплексные коммуникационные устройства могут быть

созданы на начальном этапе лишь в терагерцовом диапазоне, в котором длина распространения плазмонов составляет десятки сантиметров как на плоских поверхностях [13], так и на проволоках [14]. Очевидно, что закрученные плазмоны могут распространяться только по цилиндрическим проводникам. В работе [15] были предложены оптические схемы для возбуждения плазмонов на цилиндрических проводниках.

Одним из наиболее распространенных способов генерации закрученных ППП является метод дифракции излучения на краю проводника (см. работы [13, 16] и ссылки в них). В нашем случае торец цилиндра можно освещать кольцевыми пучками, сформированными с помощью дифракционных аксиконов или линз, аподизированных аксиконами. Большое разнообразие формируемых таким способом пучков продемонстрировано в работах [17–19], а в [20] такие пучки были получены в терагерцовом диапазоне, используя излучение Новосибирского лазера на свободных электронах [21].

В настоящем сообщении приведены приближенные аналитические выражения, связывающие параметры аксиконов с радиусом цилиндрических проводников, позволяющие подобрать условия, при которых в планируемых экспериментах можно сформировать ППП с необходимым углом азимутальной закрутки. Расчеты выполнены для диапазона длин волн 8–141 мкм, который соответствует диапазону длин волн, генерируемых Новосибирским лазером на свободных электронах.

Мы рассматриваем две конфигурации оптической системы, показанные на рис. 1 в [15]. Гауссов пучок освещает бинарный спиральный фазовый аксикон с периодом  $p$ , который формирует осесимметричный Бесселев пучок с ОУМ

$$E(z, r, \varphi) = E_0 J_\ell(\kappa r) \exp(k_z z + i\ell\varphi), \quad (1)$$

$$k = 2\pi/\lambda = \sqrt{k_z^2 + \kappa^2}, \quad \kappa = 2\pi/p. \quad (2)$$

Траектория вектора Пойнтинга представляет собой двухпараметрическую спираль [22]

$$r = \text{const}, \quad \varphi = \varphi_0 + \frac{\ell z}{r^2 \sqrt{k^2 - \kappa^2}} \quad (3)$$

с шагом

$$\Delta z = \frac{2\pi r^2 \sqrt{k^2 - \kappa^2}}{\ell}, \quad (4)$$

величина которого растет для периферийных областей как  $r^2$ . То есть внутренние кольца Бесселева пучка вращаются значительно быстрее внешних. Если диаметр первого кольца приблизительно равен или несколько больше диаметра цилиндра, на поверхности последнего возникнет вращающийся ППП. Поскольку электрическое поле плазмона направлено по нормали к поверхности, для возбуждения однородно-

го по азимуту ППП нужно использовать радиально поляризованный Бесселев пучок, который можно сформировать, например, если перед аксиконом установить сегментную волновую пластинку [23].

При возбуждении плазмона собственно Бесселевым пучком может возникнуть одна проблема. Поскольку фаза соседних колец Бесселева пучка отличается на  $\pi$ , то при малом коэффициенте экспоненциального затухания амплитуды ППП в направлении, перпендикулярном поверхности, в область формирования электрического поля плазмона может попасть второе кольцо пучка, и интеграл перекрытия (см. выражение (7) в [15]) может оказаться малым, что снизит эффективность образования плазмона. Решением проблемы может быть использование «идеальных» ("perfect") закрученных пучков [24], представляющих собой одиночные закрученные кольцевые пучки. Установив дополнительную линзу (рис. 1б в [15]), получим в её фокальной плоскости закрученный кольцевой пучок

Для того, чтобы реализовать обе описанные выше схемы в эксперименте, необходимо согласовать параметры аксикона, диаметр цилиндрического образца и обеспечить «закрутку» плазмона, достаточную, чтобы она была заметна на длине его распространения вдоль проводника. Вычислим угол поворота траектории вектора Пойнтинга на единицу длины оптической оси пучка для первых колец Бесселевых пучков, созданных бинарными фазовыми аксиконами. Дифференцируя правое выражение (3) и считая, что  $\lambda < p$ , получим

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{\ell}{2\pi r^2 \sqrt{\lambda^{-2} - p^{-2}}} \approx \frac{\ell\lambda}{2\pi r^2}. \quad (5)$$

Угол наклона траектории вектора Пойнтинга от оси  $z$  на поверхности цилиндра радиуса  $r$  равен

$$\alpha \approx r \frac{d\varphi}{dz} \approx \frac{\ell\lambda}{2\pi r}. \quad (6)$$

Нас интересует направление вектора Пойнтинга в первом максимуме Бесселевой функции, радиус которого равен

$$\rho(\ell, p) = (\kappa r)_\ell / \kappa = (\kappa r)_\ell p / 2\pi. \quad (7)$$

Подставив значения аргумента  $(\kappa r)_\ell$  Бесселевой функции [25, С. 201], построим график (чёрные точки), показанный на рис. 1. Для дальнейших оценок достаточно аппроксимировать его линейной функцией  $F(\ell)$ , значения которой справедливы только для целых  $\ell$ :

$$F(\ell) \equiv (\kappa r)_\ell \approx (1,244 \pm 0,026)\ell. \quad (8)$$

Тогда радиус первого максимума Бесселева пучка (7) можно аппроксимировать выражением

$$\rho(\lambda, \ell) = \frac{F(\ell)p}{2\pi} \approx 0,20\lambda\ell(p/\lambda), \quad (9)$$

а выражение (6) примет вид:

$$\alpha \approx \frac{\ell \lambda}{F(\ell)p} = \frac{0,80}{(p/\lambda)}. \quad (10)$$

Таким образом, для угла вектора Пойнтинга относительно оптической оси для первых Бесселевых колец мы получаем в нашем приближении выражение (10), не зависящее от величины топологического заряда и с точностью до коэффициента совпадающее с классической дифракционной формулой  $\alpha \sim \lambda/p$ .

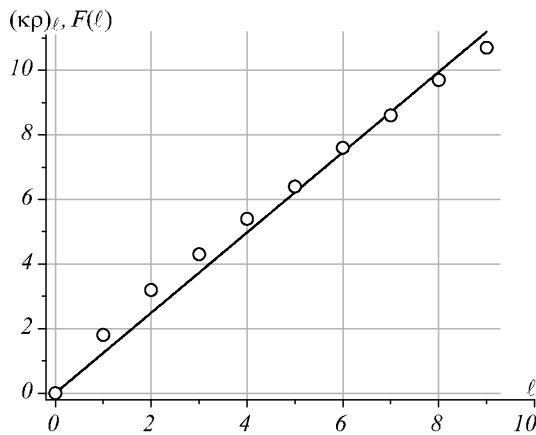


Рис. 1. Величины  $(kp)_\ell$  (точки) и их аппроксимация  $F(\ell)$  (прямая) как функции модуля топологического заряда  $\ell$

Для запуска плазмона цилиндрический проводник следует установить на оптической оси аксикона на расстоянии, на котором полностью формируется Бесселев пучок (см. [15, 20]):

$$Z_0 = \frac{R_1 + R_2}{2 \operatorname{tg}[\arcsin(\lambda/p)]} \approx \langle R \rangle (p/\lambda). \quad (11)$$

Здесь  $R_1$  – внешний радиус аксикона, а  $R_2$  – внутренний радиус (если центральная часть аксикона закрыта непрозрачным диском).

Выражения (9), (10) и (11) позволяют связать между собой радиус Бесселева пучка, угол наклона вектора Пойнтинга и расстояние, на котором формируется пучок. Все они зависят от параметра  $p/\lambda$ , и лишь радиус зависит еще от длины волны и величины топологического заряда  $\ell$ . Зависимости этих величин от отношения  $p/\lambda$  приведены на графике, представленном на рис. 2. Величина радиуса первого кольца Бесселева пучка приведена для длин волн 8,5 и 141 мкм и модулей топологических зарядов  $\ell=1, 3, 9$ . Видно, что приемлемая величина угла наклона вектора Пойнтинга (порядка нескольких градусов) достигается при отношении  $p/\lambda \sim 4 \div 10$ . При этом для терагерцового диапазона для больших  $\ell$  радиус первого Бесселева кольца лежит вблизи одного миллиметра, а для среднего ИК – вблизи 100 мкм.

В технологических применениях гораздо удобнее воспользоваться замечательным свойством бинарных аксиконов, имеющих одинаковый период решетки  $p$ .

Для заданной длины волны  $\lambda$ , независимо от величины и знака топологического заряда  $\ell$ , мы получаем в фокальной плоскости линзы фурье-образ пучка в виде кольца одинакового радиуса,

$$r_F = f/(p/\lambda), \quad (12)$$

где  $f$  – фокальное расстояние линзы. При этом топологический заряд кольцевого пучка идентичен топологическому заряду исходного пучка. Радиус кольцевого пучка при использовании линзы с фокусом 50 мм показан на рисунке звездочками. Он равен нескольким миллиметрам. Если желательно транспортировать ППП по цилиндру меньшего радиуса, то после захвата плазмона на торце проводника радиус последнего можно плавно уменьшить, что заодно приведет к увеличению скорости вращения ППП при сохранении величины и знака топологического заряда.

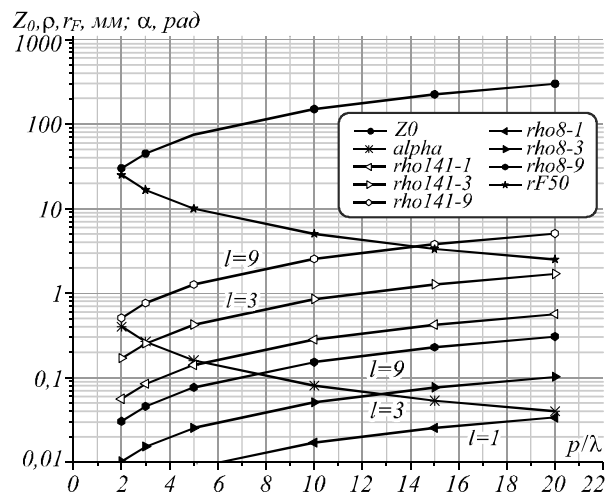


Рис. 2. Основные параметры Бесселевых пучков, сформированных с помощью спиральных фазовых аксиконов (см. выражения (9-12)), в зависимости от отношения периода аксикона к длине волны излучения для длин волн 141 и 8,5 мкм;  $\ell$  – топологический заряд пучка

Таким образом, в настоящей работе показано, что для генерации на проволоках терагерцовых плазмон с орбитальным угловым моментом можно использовать закрученные пучки, полученные с помощью бинарных фазовых аксиконов, которые легко изготовить с помощью фотолитографии. Графики, представленные на рис. 2, позволяют найти диапазоны параметров экспериментов по моделированию плазмонных коммуникационных систем. Сформированные ППП могут переносить ОУМ вдоль проводника, превращаясь, как было показано в [13], на конце провода в свободную волну. Если в экспериментах будет показано, что модовый состав этой волны будет отражать модовый состав излучения, сформированного плазмона на входе, подобно тому, как сохраняется модовый состав свободной волны, прошедшей через неоднородную среду [7], тогда будет показана

возможность применения «закрученных» плазмонов для создания мультиплексных передающих линий.

Заметим в заключение, что дифракционные элементы позволяют реализовать весьма оригинальные конфигурации передающих линий. Используя метод формирования двух близко расположенных закрученных кольцевых пучков с разнонаправленной радиальной поляризацией [26, 27], можно возбуждать плазмоны на торце тонкостенного полого цилиндра [28]. Продемонстрированный в [29] способ получения «решётки» кольцевых закрученных микропучков методом дифракции Бесселева пучка на двумерной решётке круглых отверстий позволяет «запустить» одновременно группу закрученных плазмонов на системе параллельных проволочек.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-12-00103. При выборе расчетных параметров использованы результаты экспериментов, выполненных в ИЯФ СО РАН с использованием оборудования ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Новосибирский ЛСЭ».

### Литература

1. **Willner, A.E.** Optical communications using orbital angular momentum beams / A.E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7, Issue 1. – P. 66-106.
2. **Алмазов, А.А.** Формирование и селекция лазерных пучков, являющихся суперпозицией произвольного числа угловых гармоник, с помощью фазовых дифракционных оптических элементов / А.А. Алмазов, С.Н. Хонина, В.В. Котляра // *Оптический журнал*. – 2005. – Т. 72, № 5. – С. 45-54.
3. **Krenn, M.** Twisted light communication through turbulent air across Vienna / M. Krenn, R. Fickler, M. Fink, J. Handsteiner, M. Malik, T. Scheidl, R. Ursin, A. Zeilinger // *New Journal of Physics*. – 2014. – Vol. 16, Issue 11. – 113028.
4. **Tamburini, F.** Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test / F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, B. Thidé, A. Bianchini, F. Romanato // *New Journal of Physics*. – 2012. – Vol. 14, Issue 3. – 033001.
5. **Yan, Y.** High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing / Y. Yan, G. Xie, M.P. Lavery, H. Huang, N. Ahmed, C. Bao, Y. Ren, Y. Cao, L. Li, Z. Zhao, A.F. Molisch // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5, Issue 1. – 4876.
6. **Porfirev, A.P.** Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium / A.P. Porfirev, M.S. Kirilenko, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56, Issue 11. – P. E8-E15.
7. **Khonina, S.N.** A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Paranin // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 68-74.
8. **Карпеев, С.В.** Возможности передачи и детектирования модулированных пучков с длиной волны 1530 нм в условиях случайных флуктуаций среды распространения / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, Н.А. Ивлиев, В.Д. Паранин // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 368-375. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-368-375.
9. **Князев, Б.А.** Пучки фотонов с ненулевой проекцией орбитального момента импульса – новые результаты / Б.А. Князев, В.Г. Сербо // *Успехи физических наук*. – 2018. – Т. 188, № 5. – С. 508-539.
10. **Голуб, М.А.** Фазовые пространственные фильтры, согласованные с поперечными модами / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, Н.Л. Казанский, А.В. Мирзов, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, Г.В. Уваров // *Квантовая электроника*. – 1988. – Т. 15, № 3. – С. 617-618.
11. **Duparre, M.R.** Generation, superposition and separation of Gauss-Hermite modes by means of DOEs / M.R. Duparre, B. Kley, R. Kowarschik, B. Ludge, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer // *Proceedings of SPIE*. – 1998. – Vol. 3291. – P. 104-114.
12. **Zhang, X.** Terahertz surface plasmonic waves: A review / X. Zhang, Q. Xu, L. Xia, Y. Li, J. Gu, Z. Tian, C. Ouyang, J. Han, W. Zhang // *Advanced Photonics*. – 2020. – Vol. 2, Issue 1. – 014001.
13. **Gerasimov, V.V.** Surface plasmon polaritons launched using a terahertz free-electron laser: propagation along a gold–ZnS–air interface and decoupling to free waves at the surface edge / V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev, I.A. Kotelnikov, A.K. Nikitin, V.S. Cherkassky, G.N. Kulipanov, G.N. Zhizhin // *Journal of Optical Society of America B*. – 2013. – Vol. 30, Issue 8. – P. 2182-2190.
14. **Wang, K.** Metal wires for terahertz wave guiding / K. Wang, D.M. Mittleman // *Nature*. – 2004. – Vol. 432(7015). – P. 376-379.
15. **Князев, Б.А.** Возможность генерации терагерцевых и инфракрасных поверхностных плазмон-поляритонов с орбитальным угловым моментом на цилиндрических проводниках с помощью дифракционных оптических элементов / Б.А. Князев, О.Е. Камешков, А.К. Никитин, В.С. Павельев, Ю.Ю. Чопорова // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 992-1000. – DOI: DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-992-1000/
16. **Fisher, C.** End-fire coupling efficiencies of surface plasmons for silver, gold, and plasmonic nitride compounds / C. Fisher, L.C. Botten, C.G. Poulton, R.C. McPhedran, C.M. de Sterke // *Journal of Optical Society of America B*. – 2016. – Vol. 33, Issue 6. – P. 1044-1054.
17. **Устинов, А.В.** Влияние соотношения ширины полос дифракционной кольцевой решетки на распределение энергии в фокальной плоскости / А.В. Устинов, А.П. Порфирьев, С.Н. Хонина // *Оптический журнал*. – 2017. – Т. 84, № 9. – С. 3-12.
18. **Khonina, S.N.** Diffractive axicon with tunable fill factor for focal ring splitting / S.N. Khonina, A.P. Porfirev, A.V. Ustinov // *Proceedings of SPIE*. – 2017. – Vol. 10233. – 102331P. – DOI: 10.1117/12.2265017.
19. **Khonina, S.N.** 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // *Applied Physics B*. – 2018. – Vol. 124, Issue 9. – 191.
20. **Choporova, Yu.Yu.** High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range / Yu.Yu. Choporova, B.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, V.S. Pavelyev, M.A. Scheglov, N.A. Vinokurov, B.O. Volodkin, V.N. Zhabin // *Physical Review A*. – 2017. – Vol. 96, Issue 2. – 023846.
21. **Knyazev, B.A.** Recent experiments at NovoFEL user stations / B.A. Knyazev, I.A. Azarov, E.N. Chesnokov, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, Y.I. Gorbachev, Y.V. Getmanov, B.G. Goldenberg, O.E. Kameshkov, P.V. Koshlyakov, I.A. Kotelnikov, A.S. Kozlov,

- V.V. Kubarev, G.N. Kulipanov, S.B. Malyshkin, A.K. Nikitin, P.A. Nikitin, N.D. Osintseva, V.S. Pavelyev, S.E. Peltek, A.K. Petrov, V.M. Popik, T.V. Salikova, M.A. Scheglov, S.S. Seredniakov, V.N. Shastin, O.A. Shevchenko, V.A. Shvets, D.A. Skorokhod, A.N. Skrinsky, S.L. Veber, N.A. Vinokurov, V.B. Voloshinov, R.Kh. Zhukavin // EPJ Web of Conferences. – 2018. – Vol. 195. – 00002.
22. **Berry, M.V.** Exact and geometrical optics energy trajectories in twisted beams / M.V. Berry, K.T. McDonald // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2008. – Vol. 10, Issue 3. – 035005. – DOI: 10.1051/epjconf/201819500002.
23. **TYDEX.** ТГц монохроматические волновые пластинки [Электронный ресурс]. URL: [http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz\\_optics/thz\\_waveplate1/](http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_waveplate1/) (дата обращения 15.06.2020).
24. **Ostrovsky, A.S.** Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator / A.S. Ostrovsky, C. Rickenstorff-Parrao, V. Arrizón // Optics Letters. – 2013. – Vol. 38, Issue 4. – P. 534-536.
25. Специальные функции / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш; под ред. Л.И. Седова. – Изд. 3-е, стер. – М.: Физматлит, 1977. – 344 с.
26. **Kozawa, Y.** Focusing property of a double-ring-shaped radially polarized beam / Y. Kozawa, S. Sato // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31, Issue 6. – P. 820-822.
27. **Karpeev, S.V.** Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer / S.V. Karpeev, V.D. Pararin, S.N. Khonina // Journal of Optics. – 2017. – Vol. 19, Issue 5. – 055701.
28. **Schröter, U.** Surface plasmon polaritons on metal cylinders with dielectric core / U. Schröter, A. Dereux // Physical Review B. – 2001. – Vol. 64, Issue 12. – 125420.
29. **Kotelnikov, I.A.** Diffraction of Bessel beams on 2D amplitude gratings—a new branch in the Talbot effect study / I.A. Kotelnikov, O.E. Kameshkov, B.A. Knyazev // Journal of Optics. – 2020. – Vol. 22, Issue 6. – 065603.

### Сведения об авторах

**Князев Борис Александрович**, 1942 года рождения, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 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).

**Павельев Владимир Сергеевич**, 1970 года рождения, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского университета; 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).

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 25 марта 2020 г. Окончательный вариант – 04 июля 2020 г.

---

# Optimization of parameters of binary phase axicons for the generation of terahertz vortex surface plasmon polaritons on cylindrical conductors

B.A. Knyazev<sup>1,2</sup>, V.S. Pavelyev<sup>1,3,4</sup>

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

<sup>2</sup> Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Russia, Novosibirsk Region, Novosibirsk, Lavrentiev Ave, 11,

<sup>3</sup> IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,

443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

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

## Abstract

The feasibility of generating surface plasmon polaritons carrying orbital angular momentum ("vortex plasmons") on cylindrical conductors by an end-fire coupling technique in the spectral range from 8.5 to 141  $\mu\text{m}$  ( $\sim 2\text{-}40$  THz) is considered. The front face of the cylinder is illuminated by Bessel beams formed using binary spiral phase axicons, or annual vortex beams formed in the focal plane of an additional lens. Graphs are constructed that reveal the relationship between the waveguide parameters (conductor diameter, which is equal to the diameter of the illuminating beam, and the "twist" angle of the plasmon) and the axicon parameters (the ratio of the axicon period to the radiation wavelength) for the above wavelengths and topological charges of the beams ranging from 1 to 9. The results obtained indicate the possibility of conducting experiments in the long-wavelength range for modeling a plasmon multiplex communication channel.

**Keywords:** surface plasmon-polariton, binary phase axicon, vortex beams.

**Citation:** Knyazev BA, Pavelyev VS. Optimization of parameters of binary phase axicons for the generation of terahertz vortex surface plasmons on cylindrical conductors. *Computer Optics* 2020; 44(5): 852-856. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-726.

**Acknowledgements:** This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation 19-12-00103. In the calculations, results of the experiments performed using the infrastructure of the Shared research facility "Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Center (SSTRC)" based on "NovoFEL" of BINP SB RAS were employed.

## References

- [1] Willner AE, Huang H, Yan Y, Ren Y, Ahmed N, Xie G, Bao C, Li L, Cao Y, Zhao Z, Wang J. Optical communications using orbital angular momentum beams. *Adv Opt Photonics* 2015; 7(1): 66-106.
  - [2] Almazov AA, Khonina SN, Kotlyar VV. Using phase diffraction optical elements to shape and select laser beams consisting of a superposition of an arbitrary number of angular harmonics. *J Opt Technol* 2005; 72(5): 391-399.
  - [3] Krenn M, Fickler R, Fink M, Handsteiner J, Malik M, Scheidl T, Ursin R, Zeilinger A. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna. *New J Phys* 2014; 16(11): 113028.
  - [4] Tamburini F, Mari E, Sponselli A, Thidé B, Bianchini A, Romanato F. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test. *New J Phys* 2012; 14(3): 033001.
  - [5] Yan Y, Xie G, Lavery MP, Huang H, Ahmed N, Bao C, Ren Y, Cao Y, Li L, Zhao Z, Molisch AF. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing. *Nat Commun* 2014; 5(1): 4876.
  - [6] Porfirev AP, Kirilenko MS, Khonina SN, Skidanov RV, Soifer VA. Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium. *Appl Opt* 2017; 56(11): E8-E15.
  - [7] Khonina SN, Karpeev SV, Parinin VD. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre-Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles. *Opt Lasers Eng* 2018; 105: 68-74.
  - [8] Karpeev SV, Podlipnov VV, Ivliev NA, Parinin VD. Transmission and detection of informationally loaded beams of wavelength 1530 nm in a random fluctuating medium. *Computer Optics* 2019; 43(3): 368-375. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-368-375.
  - [9] Knyazev BA, Serbo VG. Beams of photons with nonzero orbital angular momentum projection: new results. *Physics-Uspekhi* 2018; 61(5): 449-479.
  - [10] Golub MA, Karpeev SV, Kazanskiy NL, Mirzov AV, Sissakyan IN, Soifer VA, Uvarov GV. Spatial phase filters matched to transverse modes. *Sov J Quantum Electron* 1988; 18(3): 392-393. DOI: 10.1070/QE1988v018n03ABEH011528.
  - [11] Duparre MR, Pavelyev VS, Luedge B, Kley EB, Soifer VA, Kowarschik RM. Generation, superposition, and separation of Gauss-Hermite modes by means of DOEs. *Proc SPIE* 1998; 3291: 104-114.
  - [12] Zhang X, Xu Q, Xia L, Li Y, Gu J, Tian Z, Ouyang C, Han J, Zhang W. Terahertz surface plasmonic waves: a review. *Advanced Photonics* 2020; 2(1): 014001.
  - [13] Gerasimov VV, Knyazev BA, Kotelnikov IA, Nikitin AK, Cherkassky VS, Kulipanov GN, Zhizhin GN. Surface plasmon polaritons launched using a terahertz free-electron laser: propagation along a gold-ZnS-air interface and decoupling to free waves at the surface edge. *J Opt Soc Am B* 2013; 30(8): 2182-2190.
  - [14] Wang K, Mittleman DM. Metal wires for terahertz wave guiding. *Nature* 2004; 432(7015): 376-379.
  - [15] Knyazev BA, Kameshkov OE, Nikitin AK, Pavelyev VS, Choporova YuYu. Feasibility of generating surface plas-
-

- 
- mon 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.
- [16] Fisher C, Botten LC, Poulton CG, McPhedran RC, de Sterke CM. End-fire coupling efficiencies of surface plasmons for silver, gold, and plasmonic nitride compounds. *J Opt Soc Am B* 2016; 33(6): 1044-1054.
- [17] 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.
- [18] Khonina SN, Porfirev AP, Ustinov AV. Diffractive axicon with tunable fill factor for focal ring splitting. *Proc SPIE* 2017; 10233: 102331P. DOI: 10.1117/12.2265017.
- [19] Khonina SN, Porfirev AP. 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons. *Applied Physics B* 2018; 124(9): 191.
- [20] 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.
- [21] Knyazev BA, Azarov IA, Chesnokov EN, et al. Recent experiments at NovoFEL user stations. *EPJ Web of Conferences* 2018; 195: 00002. DOI: 10.1051/epjconf/201819500002.
- [22] Berry MV, McDonald KT. Exact and geometrical optics energy trajectories in twisted beams. *J Opt A: Pure Appl Opt* 2008; 10(3): 035005.
- [23] TYDEX. THz Waveplates [In Russian]. Source: [http://www.Tydexoptics.com/ru/products/thz\\_optics/thz\\_waveplate1/](http://www.Tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_waveplate1/).
- [24] 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.
- [25] Lösch F, Emde F, Jahnke E. *Tables of higher functions*. Teubner; 1960.
- [26] Kozawa Y, Sato S. Focusing property of a double-ring-shaped radially polarized beam. *Opt Lett* 2006; 31(6): 820-822.
- [27] Karpeev SV, Parandin VD, Khonina SN. Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer. *J Opt* 2017; 19(5): 055701.
- [28] Schröter U, Dereux A. Surface plasmon polaritons on metal cylinders with dielectric core. *Phys Rev B* 2001; 64(12): 125420.
- [29] Kotelnikov IA, Kameshkov OE, Knyazev BA. Diffraction of Bessel beams on 2D amplitude gratings—a new branch in the Talbot effect study. *J Opt* 2020; 22(6): 065603.
- 

#### *Authors' information*

**Boris Aleksandrovich Knyazev** (b. 1942) Doctor in Physics and Math, principal researcher at Budker Institute of Nuclear Physics and Head of Laboratory of Applied Electrodynamics at Novosibirsk State University. Research interests: optics, spectroscopy, lasers, terahertz radiation, plasma physics, high-power electron and ion beams. E-mail: [ba\\_knyazev@phys.nsu.ru](mailto:ba_knyazev@phys.nsu.ru).

**Vladimir Sergeevich Pavelyev** (b. 1970) 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).

---

*Received March 25, 2020. The final version – July 4, 2020.*

---