

# Возможность генерации терагерцовых и инфракрасных поверхностных плазмон-поляритонов с орбитальным угловым моментом на цилиндрических проводниках с помощью дифракционных оптических элементов

Б.А. Князев<sup>1,2</sup>, О.Э. Камешков<sup>1,2</sup>, А.К. Никитин<sup>1,3</sup>, В.С. Павельев<sup>1,4,5</sup>, Ю.Ю. Чопорова<sup>1,2</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,  
630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 11;

<sup>3</sup> Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,  
117342, Россия, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 15;

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

<sup>5</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

## Аннотация

Рассмотрены три оптические системы, использующие дифракционные оптические элементы для генерации поверхностных плазмон-поляритонов с орбитальным угловым моментом на осесимметричных проводниках. Во всех трёх системах падающее излучение сначала преобразуется бинарными спиральными фазовыми аксиконами в совокупность сходящихся к оптической оси плоских волн. В зоне пересечения этих волн формируется «закрученный» Бесселев пучок. Подогнав диаметр первого кольца Бесселева пучка к диаметру цилиндрического проводника, можно генерировать вращающийся поверхностный плазмон-поляритон методом дифракции на краю ("end-fire coupling"). Использование дополнительной линзы позволяет преобразовать возбуждающий поверхностный плазмон-поляритон Бесселев пучок в закрученный кольцевой пучок, диаметр которого не зависит от топологического заряда пучка. В третьей схеме сходящиеся плоские волны «перехватываются» цилиндрической металлической дифракционной решёткой, формирующей закрученные поверхностные плазмон-поляритоны на присоединённом к решётке цилиндрическом проводнике. Приведены примеры возможного использования предлагаемых систем в экспериментах на терагерцовом лазере на свободных электронах.

**Ключевые слова:** поверхностные плазмон-поляритоны, терагерцовое и инфракрасное излучение, бинарный фазовый аксикон, цилиндрическая решётка.

**Цитирование:** Князев, Б.А. Возможность генерации терагерцовых и инфракрасных поверхностных плазмон-поляритонов с орбитальным угловым моментом на цилиндрических проводниках с помощью дифракционных оптических элементов / Б.А. Князев, О.Э. Камешков, А.К. Никитин, В.С. Павельев, Ю.Ю. Чопорова // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 992-1000. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-992-1000.

## Введение

Поверхностные плазмон-поляритоны (далее – ППП или просто «плазмоны»), распространяющиеся вдоль границ раздела «проводник-диэлектрик» [1–4], играют важную роль во многих оптических явлениях и могут использоваться в системах интегральной оптики в качестве носителей информации и энергии. Пробеги плазмонов в видимом и ближнем ИК-диапазонах очень малы (десятки мкм), поэтому они могут использоваться только в системах малоразмерной интегральной оптики. С увеличением длины волны пробеги плазмонов растут, достигая значений, равных сантиметрам и десяткам сантиметров [5]. Далее мы будем иметь в виду плазмоны, длины волн которых превышают 8 мкм, то есть плазмоны среднего ИК- и терагерцового диапазонов. Эти плазмоны могут использоваться в системах связи [6], распространяясь вдоль линии передачи (однопроводный или двухпро-

водный волновод), применяться как переключатели в логических схемах [7] или, используя свойство длинноволновых ППП, преодолевать разрывы в проводниках значительной длины [8–10], служить промежуточным звеном в преобразователях «свободная волна – плазмон – свободная волна». Обзор последних достижений плазмоники и её ближайших перспектив можно найти в [11].

Во всех практически интересных случаях одной из важнейших задач является эффективное преобразование свободной волны в поверхностный плазмон. Основными применяемыми геометриями являются плоский или цилиндрический проводник. Свойства плазмонов для обеих геометрий детально описаны в [12]. На цилиндре можно создать плазмон, имеющий отличную от нуля проекцию орбитального углового момента и, следовательно, дополнительную степень свободы по сравнению с классическим плазмоном. Не

исключено также, что можно создать и комбинацию таких плазмонов, что обеспечит мультиплексность передачи информации по плазмонной линии связи.

Далее, после краткого обзора публикаций, предшествующих данной работе, мы рассмотрим три варианта оптических систем, которые планируется использовать для генерации плазмонов с орбитальным угловым моментом на Новосибирском лазере на свободных электронах.

### 1. Плазмоны на плоских и цилиндрических проводниках

Плазмоны в видимой и ближней инфракрасной областях спектра хорошо изучены, и измеренные характеристики ППП хорошо согласуются с расчётами, выполненными в рамках теории Друдэ. Согласно теории, длина распространения плазмонов должна возрастать как квадрат длины волны, но, начиная с самых ранних измерений [13–15] и в современных работах (см., например, [16–18]), измеренные в терагерцовом диапазоне пробеги плазмонов на плоских поверхностях оказались значительно меньше расчётных. В качестве возможных причин назывались как радиационные потери, так и омические потери, превышающие расчётные.

Возможность снижения омических потерь за счёт уменьшения доли электромагнитного поля плазмона в проводнике послужила одним из мотивов возрождения интереса к терагерцовым плазмонам, распространяющимся по цилиндрическим проводникам [19, 20]. Характеристики плазмонов, как показано в теоретической работе [21], сильно зависят от тонких слоёв диэлектрика, нанесённых на проволоку, что позволяет использовать ППП для диагностики покрытий. Нанесение рельефа на поверхность проволочек, в частности, кольцевых канавок, позволяет управлять дисперсионной кривой плазмона (в данном случае spoof-плазмона) и сильнее связывать его с поверхностью, а также фокусировать электромагнитное поле на остриях. Эта возможность продемонстрирована расчётами в [22–23]. В работах [24–26] было предложено генерировать плазмоны с орбитальным угловым моментом, используя цилиндрические проводники с субволновой винтовой нарезкой. Численные расчёты были выполнены в приближении идеального проводника. Была сделана только одна попытка экспериментально проверить возможность получения «закрученных» плазмонов [26], показавшая, что резонансы поглощения широкополосного терагерцового излучения находятся на предсказываемых расчётами частотах, но прямых измерений распределения поля плазмонов не проводилось.

Поскольку в данной работе для генерации плазмонов терагерцового диапазона будут использованы Бесселевы пучки (БП), следует упомянуть две работы предшественников. В работе [27] описан эксперимент по возбуждению на проволочке плазмонных мод с помощью обычного аксикона, формирующего Бесселеву волну нулевого порядка и фокусирующего излу-

чение с длиной волны 480 мкм на торец проволочки. Для повышения эффективности генерации плазмона авторы смещали ось аксикона по отношению к оптической оси проволочки, то есть освещение было не оптимальным. Никаких особых преимуществ по сравнению с фокусировкой обычной линзой этот способ, на наш взгляд, не даёт, кроме, может быть, большого угла падения возбуждающего излучения, что уводит незахваченный пучок от детектора, расположенного на конце проволочки. В другой работе тех же авторов [28] предлагается использовать бинарный спиральный аксикон, генерирующий БП первого порядка, для возбуждения плазмонов на торце цилиндрического проводника. Этот подход представляется полезным, но, к сожалению, в работе содержатся ошибочные утверждения, приведён неправильный рисунок (рис. 6 [28]), и оцененная эффективность преобразования в 80% представляется нам нереальной. К тому же авторы не проверили свои расчёты экспериментально.

В наших предыдущих работах [29–30], трансформируя Гауссов пучок Новосибирского лазера на свободных электронах [31, 32] с помощью бинарных фазовых аксиконов со спиральной структурой зон [33], изготовленных из высокоомного кремния, мы сформировали БП первого и второго порядков, несущие орбитальный угловой момент (далее «закрученные пучки» [34]). В работе [29] мы использовали эти пучки для генерации ППП на плоских границах металл-диэлектрик. Естественно, полученные таким образом плазмоны не могли иметь орбитальный угловой момент, хотя эффективность захвата могла зависеть от направления вращения падающего пучка. Плазмоны с орбитальным угловым моментом можно создать только на проводниках с осевой симметрией. Первой стадией для создания таких систем является разработка методов эффективной генерации закрученных плазмонов.

### 2. Генерация «закрученных» плазмонов методом дифракции на торце проводника

#### Генерация Бесселевым пучком

Рассмотрим оптическую схему, показанную на рис. 1а. Гауссов пучок 1, имеющий длину волны  $\lambda$ , освещает бинарный фазовый аксикон 2, имеющий спиральную структуру зон (фазовые функции аксиконов представлены на рис. 2б, в). Глубина рельефа равна

$$h = \lambda / 2(n - 1), \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления материала аксикона.

Число вложенных спиралей задаёт порядок формируемого БП (топологический заряд  $\ell = 0, 1, 2, 3, \dots$ ), а период спиральной решётки  $p$  – величину поперечного волнового числа  $\kappa = 2\pi/p$  Бесселева пучка, электрическое поле которого описывается выражением

$$E(z, r, \varphi) = E_0 J_\ell(\kappa r) \exp[i(k_z z + \ell \varphi)], \quad (2)$$

$$k = 2\pi / \lambda = \sqrt{k_z^2 + \kappa^2}, \quad (3)$$

где

$$J_\ell(\kappa r) = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} \exp[\pm i(\kappa r \cos \varphi - \ell \varphi)],$$

$r$  – радиус,  $\varphi$  – азимутальный угол.

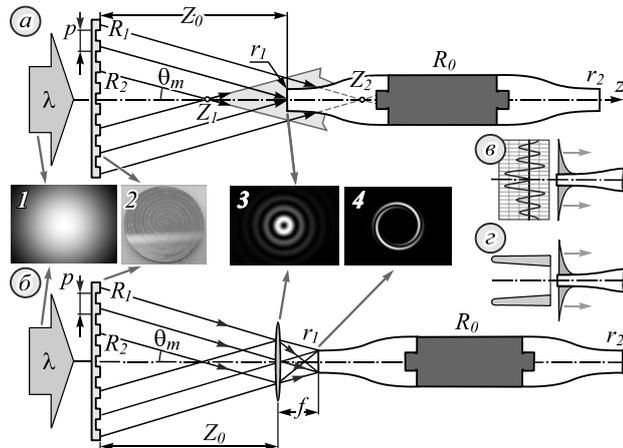


Рис. 1. Генерация поверхностных плазмон-поляритонов с помощью бинарного фазового аксикона методом дифракции излучения на краю образца (end-fire coupling): генерация непосредственно Бесселевым пучком (а); генерация в фокальной плоскости линзы (б); амплитуды поля БП второго порядка и его фурье-образ в сравнении с распределением амплитуды поля ППП на цилиндре (в, г). На врезках: 1 – Гауссов пучок, 2 – кремниевый бинарный аксикон, 3 – БП, 4 – фурье-образ БП первого порядка в фокальной плоскости линзы

Идеальный БП представляет собой суперпозицию конически сходящихся к оптической оси плоских волн. В реальном эксперименте аксикон (круговая или спиральная дифракционная решётка) ограничен по диаметру, поэтому квази-бесселев пучок существует только в зоне пересечения волн, ограниченных радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , где  $R_1$  – внешний радиус аксикона, а  $R_2$  – внутренний радиус, лучи с которого ещё попадают на цилиндрическую решётку. На расстоянии

$$Z_0 = \frac{R_1 + R_2}{2 \operatorname{tg}[\arcsin(\lambda/p)]} \xrightarrow{\lambda/p \ll 1} \frac{(R_1 + R_2)p}{2\lambda}, \quad (4)$$

на котором полностью пересекаются дифрагировавшие волны минус первого порядка от противоположных сторон аксикона, формируется БП, распределение интенсивности которого показано на рис. 1а (врезка 3). Отметим, что БП с неизменным сечением, который принято называть бездифракционным, начинает формироваться в точке  $Z_1$  и распадается после  $Z_2$  (см. подробности в [30, 34]).

Период аксикона связан с радиусом максимума интенсивности первого кольца  $r_\ell^{\max}$  соотношением

$$p = 2\pi / \kappa = 2\pi r_\ell^{\max} / (\kappa r^{\max})_\ell, \quad (5)$$

где значения  $(\kappa r^{\max})_\ell$  приведены в табл. 1, а радиус каплера (приёмного элемента волновода)  $r_c$  должен быть согласован с величиной  $r_\ell^{\max}$

$$r_c \approx r_\ell^{\max} = p \cdot (\kappa r^{\max})_\ell / 2\pi. \quad (6)$$

Форма каплера на рис. 1 выбрана вогнуто-выпуклой с целью предотвращения попадания рассеянной сво-

бодной волны в область распространения плазмонов и на детекторы, измеряющие их интенсивности.

Табл. 1. Значения  $\kappa r^{\max}$  Бесселевой функции, соответствующие первым максимумам функций порядка  $\ell$

$\ell$	0	1	2	3	4	5
$(\kappa r^{\max})$	0	1,8	3,2	4,3	5,4	6,4

Из выражений (5) и (6) следует, что радиус Бесселева пучка не зависит от длины волны для заданного топологического заряда  $\ell$ , если период аксикона не меняется. То есть один и тот же фазовый аксикон сформирует БП с одинаковым распределением интенсивности при любой длине волны, хотя дифракционная эффективность максимальна при расчётной длине волны (42 %) и уменьшается при удалении от неё. Тем не менее, для источника с плавно регулируемой длиной волны, каким является, например, лазер на свободных электронах, это свойство бинарного аксикона очень полезно. В частности, это свойство будет использовано нами в параграфе 3.

Если изготовить аксиконы с одинаковым для всех порядков  $\ell$  периодом  $p$ , радиус колец бесселевых пучков будет пропорционален значениям  $(\kappa r^{\max})_\ell$  из табл. 1, а расстояние  $Z_0$  в параксиальном приближении обратно пропорционально длине волны  $\lambda$ . То есть при генерации плазмонов по схеме рис. 1а нужно для обеспечения высокой эффективности для каждого топологического заряда изменять радиус каплера и перемещать каплер вдоль оси  $z$ . Другой возможностью является изменение периодов у аксиконов разных порядков обратно пропорционально значениям, приведённым в табл. 1. В этом случае можно использовать один и тот же каплер для генерации закрученных плазмонов пучками разных порядков.

Очевидно, что плазмон, возникший при дифракции БП на торце каплера, должен сохранять азимутальную составляющую момента импульса падающего излучения, и его суммарный волновой вектор будет «скользить» вдоль винтовой линии на поверхности цилиндра. Заметим, что плазмон может возбуждать только  $p$ -поляризованная волна, поэтому эффективность захвата максимальна, если падающее на торец цилиндра излучение поляризовано по нормали к его поверхности (см., например, [2, 12, 35]). В случае цилиндра возбуждающее плазмон излучение должно быть поляризовано по радиусу. Такой пучок может быть получен, например, путём интерференции двух Эрмит-Гауссовых пучков в интерферометре Маха-Цендера [36]. Количественно эффективность дифракционного преобразования падающего излучения в поверхностный плазмон можно оценить с помощью интеграла перекрытия [27, 37–39], который мы запишем в цилиндрических координатах

$$\eta = \frac{\int_a^\infty r dr \int_{-\pi}^\pi B_\varphi^{\text{in}}(r, \varphi) \cdot B_\varphi^{\text{SPP}}(r, \varphi) d\varphi}{\int_a^\infty \int_{-\pi}^\pi |B_\varphi^{\text{in}}(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi \int_a^\infty \int_{-\pi}^\pi |B_\varphi^{\text{SPP}}(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi}, \quad (7)$$

где  $B_\phi^{in}$  и  $B_\phi^{SPP}$  – азимутальные компоненты амплитуд магнитного поля падающей волны и ППП на цилиндре,  $a$  – радиус переднего торца входного каплера. В случае цилиндрической геометрии интеграл нужно вычислить для всех возможных азимутальных мод ППП. Можно ожидать, что величина  $\eta$  будет максимальна для плазмонной моды с фазовым множителем  $\exp(i\ell\phi)$ , идентичным фазовому множителю падающей волны. Очевидно, что величина интеграла в случае освещения торца Бесселевой волной, у которой фаза соседних колец отличается на  $\pi$ , существенно зависит от глубины проникновения поля плазмона в воздух (рис. 1б). Если в неё попадает несколько Бесселевых колец, то подынтегральное выражение осциллирует и величина интеграла уменьшается. Глубину проникновения можно уменьшить до размера первого кольца, покрывая металл тонким слоем диэлектрика [33].

**Генерация в фурье-плоскости**

Величину интеграла перекрытия можно сделать достаточно большой для любого БП, если освещать торец проводника через дополнительную линзу (рис. 1б, з). Радиус кольца, формирующегося в фокальной плоскости линзы с фокальной длиной  $f$ , равен

$$R_f \approx \lambda f / p \tag{8}$$

и одинаков для любого  $\ell$ , если период  $p$  аксиконов одинаков. Меняя линзы с разными фокусными расстояниями, можно легко подгонять радиус кольца к радиусу каплера. Например, для длины волны 141 мкм и периода 3,1 мм радиус кольца при фокусном расстоянии 50 мм составит 2,3 мм, а при длине волны 47 мкм тот же радиус получим с линзой с фокусным расстоянием 150 мм.

Из врезки 4 на рис. 1б видно, что фурье-образ пучка, создаваемого бинарным фазовым аксиконом, не является сплошным кольцом, как это должно быть для идеального пучка и как это получается в случае использования многоуровневого фазового элемента с концентрическим рельефом зон [40], а состоит из фрагментов вложенных спиралей с чередующимися фазами. Этот факт подтверждается как расчётами, так и экспериментами (см., например, [30, 41, 42]). Такая форма разрывов кольца в случае бинарного спирального аксикона связана с тем, что его фазовая зависимость представляет собой кусочно-постоянную функцию

$$\Phi(r, \phi) = (\pi / 2) \operatorname{sgn}(\sin(kr + \ell\phi)). \tag{9}$$

При фиксированном радиусе  $r = \text{const}$  она имеет  $2\ell$  нулей при изменении азимутального угла на  $2\pi$ . Очевидным способом получения кольцевого фурье-спектра является использование киноформного спирального аксикона, однако такой аксикон достаточно труден в изготовлении и рассчитан на одну длину волны, тогда как качество пучка и его свойства ничтожно мало отличаются от идеального бесселева пучка, как показано в [34].

Подводя итоги параграфа, можно констатировать, что бинарный фазовый аксикон оказывается парадоксальным образом более удобным, чем киноформный, позволяя гибко менять условия экспериментов.

**3. Генерация «закрученных» плазмонов с помощью цилиндрической решётки**

Рассмотрим ещё одну оптическую схему (рис. 2а), которая позволяет снять ограничения на диаметр каплера. В ней используется комбинация бинарного фазового аксикона (рис. 2б, в) и цилиндрической решётки, обеспечивающей захват (генерацию) плазмона. После захвата решёткой плазмон переходит на сменную гладкую цилиндрическую часть, имеющую разную длину и состав поверхности. Возможные конфигурации приёмной решётки показаны на рис. 2а, з, д. Очевидно, что эффективность захвата плазмона будет максимальна для решёток с углом блеска, отражающих первый порядок дифракции вдоль оси  $z$ . Решётка 2з будет менее эффективна, но проста в изготовлении, а решётка 2д позволит увести незахваченное излучение в сторону от детектора.

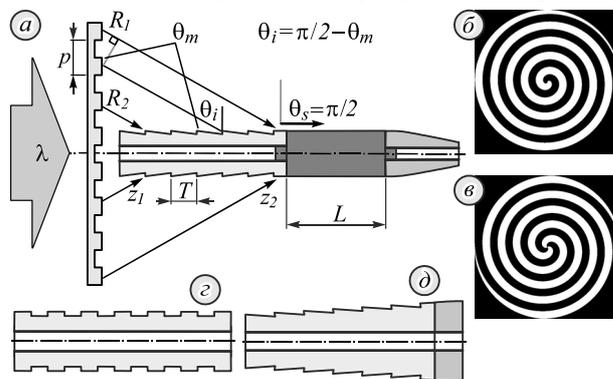


Рис. 2. Генерация поверхностных плазмон-поляритонов с помощью бинарного фазового аксикона и цилиндрической дифракционной решётки (а); фазовые функции бинарных фазовых аксиконов, формирующих Бесселевы пучки первого рода первого и второго порядков ( $\ell = 1, 2$ ), чёрный цвет соответствует значению фазы 0, белый цвет –  $\pi$  (б, в); (з, д) варианты рельефа цилиндрической решётки

Угол дифракции для  $m$ -го порядка на аксиконе равен

$$\sin \theta_m = \lambda m / p. \tag{10}$$

На коаксиальную решётку дифрагированные пучки падают под углом  $\theta_i = \pi/2 - \theta_m$ . Тогда длина освещённой части цилиндрической решётки равна

$$z_2 - z_1 = \frac{R_1 - R_2}{\operatorname{tg} \theta_m}. \tag{11}$$

Условие генерации плазмона при дифракции падающей на цилиндрическую решётку волны в  $q$ -й порядок на угол  $\theta_s = \pi/2$  определяется законом сохранения импульса

$$k_z + q \frac{2\pi c}{T} = k_s, \tag{12}$$

где  $k_z = (f/c) \sin \theta_i$  – продольная компонента падающего излучения,  $c$  – скорость света,  $k_s = f/v$  – волновое число плазмона на гладкой поверхности,  $v$  – скорость плазмона,  $f$  – частота излучения, а  $T$  – период цилиндрической решётки. В терагерцовом диапазоне скорость плазмона  $v$  практически не отличается от скорости света в вакууме,  $v \approx c$ , поэтому условие (12) примет вид [40]:

$$\frac{f}{c}(1 - \sin \theta_i) = \frac{q}{T}. \quad (13)$$

Используя (10) и (13), мы получим два соотношения, связывающие параметры аксикона и решётки:

$$\begin{cases} p = \frac{\lambda m}{\sin \theta_m} = \frac{\lambda m}{\cos \theta_i}, \\ T = \frac{q \lambda}{1 - \sin \theta_i}. \end{cases} \quad (14)$$

Поскольку для бинарного фазового аксикона дифракционная эффективность максимальна для первого дифракционного порядка (42% в минус первом порядке), то мы должны положить в выражении (14)  $m = 1$ .

Приемлемые параметры как для аксикона, так и для цилиндрической решётки получаются при значении угла падения  $\theta_i = \theta_m = \pi/4$ . Цилиндрическая решётка – фазовая отражающая, поэтому при использовании решётки с прямоугольным профилем штриха максимум отражения будет лежать в нулевом порядке, то есть в зеркально отражённом пучке. Для получения максимума дифракции в  $q = 1$  порядке при угле  $\theta_s = \pi/2$  нужно использовать решётку с углом блеска, равным  $\pi/8$ .

Параметры аксиконов и цилиндрических решёток, удовлетворяющих уравнениям (14), приведены в табл. 2, где  $h_1$  и  $h_2$  – глубина профиля кремниевого аксикона и металлической решётки,  $M$  и  $N$  – число периодов. Современные технологии позволяют изготовить как кремниевые аксиконы, так и цилиндрические решётки с параметрами, приведёнными в табл. 2.

### Заключение

В данной работе мы показали, что имеется несколько способов генерации на осесимметричных проводниках поверхностных плазмон-поляритонов с орбитальным угловым моментом в среднем инфракрасном и терагерцовом диапазонах, используя дифракционные оптические элементы. Особенности формирования Бесселевых пучков с помощью бинарных спиральных фазовых аксиконов оказались очень удобными для реализации оптических систем с возбуждением ППП на осесимметричных проводниках методом дифракции на краю (“*end-fire coupling technique*”). Возможность использования для возбуждения этим методом плазмонов не только собственно бесселевой волны, но также её фурье-образа, формируемого в фокусе линзы, позволяет легко оптимизировать параметры аксиконов и цилиндрических волноводов для реальных экспериментов.

Табл. 2. Параметры аксиконов и цилиндрических решёток для генерации плазмонов для различных значений длины волны

$\lambda$ , мкм	Кремниевый аксикон ( $n = 3,42$ )			Цилиндрическая решётка с углом блеска		
	$p$ , мкм	$h_1$ , мкм	$M$	$T$ , мкм	$h_2$ , мкм	$N$
141	199	29,1	85	480	199	35
47	68	9,9	253	163	68	104
8,5	12	1,76	1416	29	12	586

Замечательное свойство аксиконов формировать сходящиеся к оси плоские волны позволяет применить их на практике, устанавливая на оптической оси системы цилиндрическую дифракционную решётку-эшелетт, отражающую падающую волну вдоль поверхности цилиндра и, используя условие фазового синхронизма, сформировать закрученный плазмон-поляритон, распространяющийся вдоль поверхности цилиндра. Расчёты оптических систем для возбуждения закрученных ППП на длинах волн 141, 47 и 8,5 мкм, основанные на результатах данной работы, показывают, что современная технологическая база позволяет без особого труда изготовить все необходимые оптические элементы и провести эксперименты на Новосибирском лазере на свободных электронах.

### Благодарности

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

### Литература

1. **Жижин, Г.Н.** Спектроскопия поверхностных волн и свойства поверхности / Г.Н. Жижин, О.И. Капуста, М.А. Москалева, В.Г. Назин, В.А. Яковлев // Успехи физических наук. – 1975. – Т. 117(11). – С. 573-574.
2. **Zhizhin, G.N.** Surface electromagnetic wave propagation on metal surfaces / G.N. Zhizhin, M.A. Moskaleva, E.V. Shomina, V.A. Yakovlev. – In: Surface polaritons. Electromagnetic waves at surfaces and interfaces / ed. by V.M. Agranovich, D.L. Mills. – Chap. 3. – Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland Publishing Company, 1982.
3. **Raether, H.** Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings / H. Raether. – Springer-Verlag, 1988. – P. 4-39.
4. **Майер, С.А.** Плазмоника: теория и приложения / С.А. Майер. – М., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011.
5. **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.
6. **Leuthold, J.** Plasmonic communications: light on a wire / J. Leuthold, C. Hoessbacher, S. Muehlbrandt, A. Melikyan, M. Kohl, C. Koos, W. Freude, V. Dolores-Calzadilla, M. Smit, I. Suarez, J. Martinez-Pastor // Optics and Photonics News. – 2013. – Vol. 24, Issue 5. – P. 28-35.

7. **Davis, T.J.** Plasmonic circuits for manipulating optical information / T.J. Davis, D.E. Gómez, A. Roberts // *Nanophotonics*. – 2017. – Vol. 6, Issue 3. – P. 543-559.
8. **Zhizhin, G.N.** Edge effects due to propagation of surface IR / G.N. Zhizhin, M.A. Moskaleva, E.V. Shomina, V.A. Yakovlev // *JETP Letters*. – 1979. – Vol. 29, Issue 9. – P. 486-489.
9. **Nazarov, M.** THz surface plasmon jump between two metal edges / M. Nazarov, J.L. Coutaz, A. Shkurinov, F. Garet // *Optics Communications*. – 2007. – Vol. 277, Issue 1. – P. 33-39.
10. **Gerasimov, V.V.** Experimental investigations into capability of terahertz surface plasmons to bridge macroscopic air gaps / V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev, A.K. Nikitin, G.N. Zhizhin // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, Issue 26. – P. 33448-33459.
11. **Stockman, M.I.** Roadmap on plasmonics / M.I. Stockman, K. Kneipp, S.I. Bozhevolnyi, S. Saha, A. Dutta, J. Ndukaife, N. Kinsey, H. Reddy, U. Guler, V.M. Shalaev, A. Boltasseva // *Journal of Optics*. – 2018. – Vol. 20, Issue 4. – 043001.
12. **Кузьмин, А.В.** Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн / А.В. Кузьмин, Б.А. Князев // *Вестник НГУ, сер. Физика*. – 2007. – Т. 2, Вып. 1. – С. 109-122.
13. **Begley, D.L.** Propagation distances of surface electromagnetic waves in the far infrared / D.L. Begley, R.W. Alexander, C.A. Ward, R. Miller, R.J. Bell // *Surface Science*. – 1979. – Vol. 81, Issue 1. – P. 245-251.
14. **Koteles, E.S.** Far infrared surface plasmon propagation / E.S. Koteles, W.H. McNeill // *International Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. – 1981. – Vol. 2. – P. 361-371.
15. **Schlesinger, Z.** Attenuation and coupling of far infrared surface plasmons / Z. Schlesinger, B.C. Webb, A.J. Sievers // *Solid State Communications*. – 1981. – Vol. 39. – P. 1035-1039.
16. **Jeon, T.I.** THz Zenneck surface wave (THz surface plasmon) propagation on a metal sheet / T.I. Jeon, D. Grischkowsky // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 88, Issue 6. – 061113.
17. **Nazarov, M.** Surface plasmon THz waves on gratings / M. Nazarov, F. Garet, D. Armand, A. Shkurinov, J.L. Coutaz // *Comptes Rendus Physique*. – 2008. – Vol. 9, Issue 2. – P. 232-247.
18. **Knyazev, B.A.** Propagation of terahertz surface plasmon polaritons around a convex metal-dielectric interface / B.A. Knyazev, V.V. Gerasimov, A.K. Nikitin, I.A. Azarov, Y.Y. Choporova // *Journal of Optical Society of America B*. – 2019. – Vol. 36, Issue 6. – P. 1684-1689.
19. **Wang, K.** Metal wires for terahertz wave guiding / K. Wang, D.M. Mittleman // *Nature*. – 2004. – Vol. 432, Issue 7015. – P. 376-379.
20. **Wang, K.** Guided propagation of terahertz pulses on metal wires / K. Wang, D.M. Mittleman // *Journal of Optical Society of America B*. – 2005. – Vol. 22, Issue 9. – P. 2001-2008.
21. **Van der Valk, N.C.** Effect of a dielectric coating on terahertz surface plasmon polaritons on metal wires / N.C. Van der Valk, P.C. Planken // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 87, Issue 7. – 071106.
22. **Maier, S.A.** Terahertz surface plasmon-polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires / S.A. Maier, S.R. Andrews, L. Martín-Moreno, F.J. García-Vidal // *Physical Review Letters*. – 2006. – Vol. 97, Issue 17. – 176805.
23. **Fernandez-Dominguez, A.I.** Spoof surface plasmon polariton modes propagating along periodically corrugated wires / A.I. Fernandez-Dominguez, L. Martín-Moreno, F.J. García-Vidal, S.R. Andrews, S.A. Maier // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2008. – Vol. 14, Issue 6. – P. 1515-1521.
24. **Rüting, F.** Subwavelength chiral surface plasmons that carry tuneable orbital angular momentum / F. Rüting, A.I. Fernández-Dominguez, L. Martín-Moreno, F.J. García-Vidal // *Physical Review B*. – 2012. – Vol. 86, Issue 7. – 075437.
25. **Yao, H.Z.** Wideband circularly polarized vortex surface modes on helically grooved metal wires / H.Z. Yao, S. Zhong // *IEEE Photonics Journal*. – 2015. – Vol. 7, Issue 6. – P. 1-7.
26. **Fernández-Dominguez, A.I.** Terahertz surface plasmon polaritons on a helically grooved wire / A.I. Fernández-Dominguez, C.R. Williams, F.J. García-Vidal, L. Martín-Moreno, S.R. Andrews, S.A. Maier // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 93, Issue 14. – 141109.
27. **Edelmann, A.** Coupling of terahertz radiation to metallic wire using end-fire technique / A. Edelmann, L. Moeller, J. Jahns // *Electronics Letters*. – 2013. – Vol. 49, Issue 14. – P. 884-886.
28. **Edelmann, A.** Shaping of electromagnetic fields for THz plasmonics / A. Edelmann, S. Helfert, J. Jahns // *Proceedings of SPIE*. – 2014. – Vol. 8999. – 899913.
29. **Knyazev, B.A.** Generation of terahertz surface plasmon polaritons using nondiffractive Bessel beams with orbital angular momentum / B.A. Knyazev, Y.Y. Choporova, M.S. Mitkov, V.S. Pavelyev, B.O. Volodkin // *Physical Review Letters*. – 2015. – Vol. 115, Issue 16. – 163901. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.163901.
30. **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. – DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023846.
31. **Shevchenko, O.A.** The Novosibirsk Free Electron Laser – unique source of terahertz and infrared coherent radiation / O.A. Shevchenko, V.S. Arbutov, N.A. Vinokurov, P.D. Vobly, V.N. Volkov, Ya.V. Getmanov, Ya.I. Gorbachev, I.V. Davidiyuk, O.I. Deychuly, E.N. Demytyev, B.A. Dovzhenko, B.A. Knyazev, E.I. Kolobanov, A.A. Kondakov, V.R. Kozak, E.V. Kozlyev, V.V. Kubarev, G.N. Kulipanov, E.A. Kuper, I.V. Kuptsov, G.Ya. Kurkin, S.A. Krutikhin, L.E. Medvedev, S.V. Motygin, V.K. Ovchar, V.N. Osipov, V.M. Petrov, A.M. Pilan, V.M. Popik, V.V. Repkov, T.V. Salikova, I.K. Sedlyarov, S.S. Serednyakov, A.N. Skrinsky, S.V. Tararyshkin, A.G. Tribendis, V.G. Tcheskidov, K.N. Chernov, M.A. Scheglov // *Physics Procedia*. – 2016. – Vol. 84. – P. 13-18.
32. **Knyazev, B.A.** Recent experiments at NovoFEL user stations / B.A. Knyazev, I.A. Azarov, E.N. Chesnokov, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, Ya.I. Gorbachev, Ya.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. Serednyakov, 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. – DOI: 10.1051/epjconf/201819500002.
33. **Андреев, Н.Е.** Формирование трубчатых бесселевых пучков света высокой мощности / Н.Е. Андреев, С.С. Бычков, В.В. Котляр, Л.Я. Марголин, Л.Н. Пятницкий, П.Г. Серафимович // *Квантовая электроника*. – 1996. – Т. 23, № 2. – С. 130-134.
34. **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, Вып. 5. – С. 508-539.
35. **Kozlova, E.S.** Tight focusing of laser light using a surface plasmon polariton in a silver nano-strip and nano-ring on silica glass / E.S. Kozlova, V.V. Kotlyar // *Компьютерная*

- оптика. – 2016. – Т. 40, № 5. – С. 629-634. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-629-634.
36. **Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics*. – 2009. – Vol. 1. – P. 1-57.
37. **Chang, L.** Analysis of the fiber-waveguide coupling efficiency and the resulting polarization dependent loss / L. Chang, X. Sun, H. Shang, P. Liu, T.J. Hall, D. Sun // 2017 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD). – 2017. – P. 155-156. – DOI: 10.1109/NUSOD.2017.8010038.
38. **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.
39. **Gerasimov, V.V.** Growth of terahertz surface plasmon propagation length due to thin-layer dielectric coating / V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev, A.G. Lemzyakov, A.K. Nikitin, G.N. Zhizhin // *Journal of Optical Society of America B*. – 2016. – Vol. 33, Issue 11. – P. 2196-2203.
40. **Arrizon, V.** Efficient generation of an arbitrary nondiffracting Bessel beam employing its phase modulation / V. Arrizon, D. Sanchez-de-La-Llave, U. Ruiz, G. Mendez // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34. – P. 1456-1458.
41. **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. – P. 191. – DOI: 10.1007/s00340-018-7060-4.
42. **Syubaev, S.** Chirality of laser-printed plasmonic nanoneedles tunable by tailoring spiral shape pulses / S. Syubaev, A. Zhizhchenko, O. Vitrik, A. Porfirev, S. Fomchenkov, S. Khonina, S. Kudryashov, A. Kuchmizhak // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 470. – P. 526-534. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.11.128.
43. **Mukina, L.S.** Propagation of THz plasmon pulse on corrugated and flat metal surface / L.S. Mukina, M.M. Nazarov, A.P. Shkurinov // *Surface Science*. – 2006. – Vol. 600, Issue 20. – P. 4771-4776.

### Сведения об авторах

**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 заряженных частиц. E-mail: [ba\\_knyazev@phys.nsu.ru](mailto:ba_knyazev@phys.nsu.ru).

**Камешков Олег Эдуардович**, магистрант Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: физическая оптика, квантовая оптика, терагерцовое излучение. E-mail: [o.kameshkov@g.nsu.ru](mailto:o.kameshkov@g.nsu.ru).

**Никитин Алексей Константинович**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Научно-технического центра уникального приборостроения РАН, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: плазмоника. E-mail: [alnikitin@mail.ru](mailto:alnikitin@mail.ru).

**Павельев Владимир Сергеевич**, 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).

**Чопорова Юлия Юрьевна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, с.н.с. научно-исследовательской лаборатории прикладной электродинамики Новосибирского государственного университета. Область научных интересов: оптика, спектроскопия, голография, терагерцовое излучение. E-mail: [yu.yu.choporova@inp.nsk.su](mailto:yu.yu.choporova@inp.nsk.su).

ГРПТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 22 октября 2019 г. Окончательный вариант – 22 ноября 2019 г.

## Feasibility of generating surface plasmon polaritons with a given orbital momentum on cylindrical waveguides using diffractive optical elements

B.A. Knyazev<sup>1,2</sup>, O.E. Kameshkov<sup>1,2</sup>, A.K. Nikitin<sup>1,3</sup>, V.S. Pavelyev<sup>1,4,5</sup>, Yu.Yu. Choporova<sup>1,2</sup>

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

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

<sup>3</sup> Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation RAS, 15 Butlerova St., Moscow, 117342, Russia;

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

<sup>5</sup> IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,

Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia

### Abstract

Three optical systems employing diffractive optical elements to generate surface plasmon polaritons (SPP) with orbital angular momentum on axisymmetric conductors are considered. In all

three systems, the incident radiation is first converted by binary spiral phase axicons into a set of plane waves converging to the optical axis. In the zone of intersection of these waves, a "twisted" Bessel beam is formed. By fitting the diameter of the first ring of the Bessel beam to the diameter of the cylindrical conductor, it is possible to generate a rotating SPP by the "end-fire coupling" method. The use of an additional lens makes it possible to convert the SPP-exciting Bessel beam into a vortex annular beam whose diameter is independent of the topological charge of the beam. In the third scheme, converging plane waves are "intercepted" by a cylindrical metal diffraction grating, which forms twisted SPPs on a cylindrical conductor connected to the grating. Examples of the possible use of the proposed systems in experiments on a terahertz free electron laser are presented.

**Keywords:** surface plasmon polariton, binary phase axicon, cylindrical grating.

**Citation:** 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.

**Acknowledgements:** This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation 19-12-00103.

### References

- [1] Zhizhin GN, Kapusta OI, Moskaleva MA, Nazin VG, Yakovlev VA. Spectroscopy of surface waves and the properties of the surface. *Sov Phys Usp* 1975; 18: 927-928.
- [2] Zhizhin GN, Moskaleva MA, Shomina EV, Yakovlev VA. Surface electromagnetic wave propagation on metal surfaces. In Book: Agranovich VM, Mills DL, eds. *Surface polaritons. Electromagnetic waves at surfaces and interfaces*. Ch 3. Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland Publishing Company; 1982.
- [3] Raether H. *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings*. Springer-Verlag; 1988.
- [4] Maier SA. *Plasmonics: fundamentals and application*. Springer; 2007: 233.
- [5] 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.
- [6] Leuthold J, Hoessbacher C, Muehlbrandt S, Melikyan A, Kohl M, Koos C, Freude W, Dolores-Calzadilla V, Smit M, Suarez I, Martínez-Pastor J. Plasmonic communications: light on a wire. *Optics and Photonics News* 2013; 24(5): 28-35.
- [7] Davis TJ, Gómez DE, Roberts A. Plasmonic circuits for manipulating optical information. *Nanophotonics* 2017; 6(3): 543-559.
- [8] Zhizhin GN, Moskaleva MA, Shomina EV, Yakovlev VA. Edge effects due to propagation of surface IR. *JETP Lett* 1979; 29(9): 486-489.
- [9] Nazarov M, Coutaz JL, Shkurinov A, Garef F. THz surface plasmon jump between two metal edges. *Opt Commun* 2007; 277(1): 33-39.
- [10] Gerasimov VV, Knyazev BA, Nikitin AK, Zhizhin GN. Experimental investigations into capability of terahertz surface plasmons to bridge macroscopic air gaps. *Opt Express* 2015; 23(26): 33448-33459.
- [11] Stockman MI, Kneipp K, Bozhevolnyi SI, Saha S, Dutta A, Ndukaife J, Kinsey N, Reddy H, Guler U, Shalaev VM, Boltasheva A. Roadmap on plasmonics. *J Opt* 2018; 20(4): 043001.
- [12] Kuzmin FV, Knyazev BA. Surface electromagnetic waves: from visible range to microwaves. *Vestnik NSU, seriya Physics* 2007; 2(1): 109-122.
- [13] Begley DL, Alexander RW, Ward CA, Miller R, Bell RJ. Propagation distances of surface electromagnetic waves in the far infrared. *Surf Sci* 1979; 81(1): 245-251.
- [14] Koteles ES, McNeill WH. Far infrared surface plasmon propagation. *Int J Infrared Millimeter Terahertz Waves* 1981; 2: 361-371.
- [15] Schlesinger Z, Webb BC, Sievers AJ. Attenuation and coupling of far infrared surface plasmons. *Solid State Commun* 1981; 39: 1035-1039.
- [16] Jeon TI, Grischkowsky D. THz Zenneck surface wave (THz surface plasmon) propagation on a metal sheet. *Appl Phys Lett* 2006; 88(6): 061113.
- [17] Nazarov M, Garef F, Armand D, Shkurinov A, Coutaz JL. Surface plasmon THz waves on gratings. *Comptes Rendus Physique* 2008; 9(2): 232-247.
- [18] Knyazev BA, Gerasimov VV, Nikitin AK, Azarov IA, Choporova YY. Propagation of terahertz surface plasmon polaritons around a convex metal-dielectric interface. *J Opt Soc Am B* 2019; 36(6): 1684-1689.
- [19] Wang K, Mittleman DM. Metal wires for terahertz wave guiding. *Nature* 2004; 432(7015): 376-379.
- [20] Wang K, Mittleman DM. Guided propagation of terahertz pulses on metal wires. *J Opt Soc Am B* 2005; 22(9): 2001-2008.
- [21] Van der Valk NC, Planken PC. Effect of a dielectric coating on terahertz surface plasmon polaritons on metal wires. *Appl Phys Lett* 2005; 87(7): 071106.
- [22] Maier SA, Andrews SR, Martín-Moreno L, García-Vidal FJ. Terahertz surface plasmon-polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires. *Phys Rev Lett* 2006; 97(17): 176805.
- [23] Fernández-Domínguez AI, Martín-Moreno L, García-Vidal FJ, Andrews SR, Maier SA. Spoof surface plasmon polariton modes propagating along periodically corrugated wires. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2008; 14(6): 1515-1521.
- [24] Rütting F, Fernández-Domínguez AI, Martín-Moreno L, García-Vidal FJ. Subwavelength chiral surface plasmons that carry tuneable orbital angular momentum. *Phys Rev B* 2012; 86(7): 075437.
- [25] Yao HZ, Zhong S. Wideband circularly polarized vortex surface modes on helically grooved metal wires. *IEEE Photon J* 2015; 7(6): 1-7.
- [26] Fernández-Domínguez AI, Williams CR, García-Vidal FJ, Martín-Moreno L, Andrews SR, Maier SA. Terahertz surface plasmon polaritons on a helically grooved wire. *Appl Phys Lett* 2008; 93(14): 141109.
- [27] Edelmann A, Moeller L, Jahns J. Coupling of terahertz radiation to metallic wire using end-fire technique. *Electron Lett* 2013; 49(14): 884-886.
- [28] Edelmann A, Helfert S, Jahns J. Shaping of electromagnetic fields for THz plasmonics. *Proc SPIE* 2014; 8999: 899913.

- [29] Knyazev BA, Choporova YY, Mitkov MS, Pavelyev VS, Volodkin BO. Generation of terahertz surface plasmon polaritons using nondiffractive Bessel beams with orbital angular momentum. *Phys Rev Lett* 2015; 115(16): 163901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.163901.
- [30] Choporova YY, Knyazev BA, Kulipanov GN, Pavelyev VS, Scheglov MA, Vinokurov NA, Volodkin BO, Zhabin VN. High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range. *Phys Rev A* 2017; 96(2): 023846. DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023846.
- [31] Shevchenko OA, Arbutov VS, Vinokurov NA, Vobly PD, Volkov VN, Getmanov YaV, Gorbachev YaI, Davidyuk IV, Deychuly OI, Dementyev EN, Dovzhenko BA, Knyazev BA, Kolobanov EI, Kondakov AA, Kozak VR, Kozlyev EV, Kubarev VV, Kulipanov GN, Kuper EA, Kuptsov IV, Kurkin GYa, Krutikhin SA, Medvedev LE, Motygin SV, Ovchar VK, Osipov VN, Petrov VM, Pilan AM, Popik VM, Repkov VV, Salikova TV, Sedlyarov IK, Serednyakov SS, Skrinisky AN, Tararyshkin SV, Tribendis AG, Tcheskidov VG, Chernov KN, Scheglov MA. The Novosibirsk Free Electron Laser – unique source of terahertz and infrared coherent radiation. *Physics Procedia* 2016; 84: 13-18.
- [32] Knyazev BA, Azarov IA, Chesnokov EN, Choporova YY, Gerasimov VV, Gorbachev YI, Getmanov YV, Goldenberg BG, Kameshkov OE, Koshlyakov PV, Kotelnikov IA, Kozlov AS, Kubarev VV, Kulipanov GN, Malyshkin SB, Nikitin AK, Nikitin PA, Osintseva ND, Pavelyev VS, Peltek SE, Petrov AK, Popik VM, Salikova TV, Scheglov MA, Seredniakov SS, Shastin VN, Shevchenko OA, Shvets VA, Skorokhod DA, Skrinisky AN, Veber SL, Vinokurov NA, Voloshinov VB, Zhukavin RKh. Recent experiments at NovoFEL user stations. *EPJ Web of Conferences* 2018; 195: 00002. DOI: 10.1051/epjconf/201819500002.
- [33] Andreev NE, Bychkov SS, Kotlyar VV, Margolin LY, Pyatnitskii LN, Serafimovich PG, Formation of high-power hollow Bessel light beams. *Quantum Electron* 1996; 26: 126-130. DOI: 10.1070/QE1996v026n02ABEH000607.
- [34] Knyazev BA, Serbo VG. Beams of photons with nonzero orbital angular momentum projection: new results. *Phys Usp* 2018; 61(5): 449-479.
- [35] Kozlova ES, Kotlyar VV. Tight focusing of laser light using a surface plasmon polariton in a silver nano-strip and nano-ring on silica glass. *Computer Optics* 2016; 40(5): 629-634. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-629-634.
- [36] Zhan Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications. *Adv Opt Photon* 2009; 1: 1-57.
- [37] Chang L, Sun X, Shang H, Liu P, Hall TJ, Sun D. Analysis of the fiber-waveguide coupling efficiency and the resulting polarization dependent loss. *International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices 2017*: 155-156. DOI: 10.1109/NUSOD.2017.8010038.
- [38] 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.
- [39] Gerasimov VV, Knyazev BA, Lemzyakov AG, Nikitin AK, Zhizhin GN. Growth of terahertz surface plasmon propagation length due to thin-layer dielectric coating. *J Opt Soc Am B* 2016; 33(11): 2196-2203.
- [40] Arrizon V, Sanchez-de-La-Llave D, Ruiz U, Mendez G. Efficient generation of an arbitrary nondiffracting Bessel beam employing its phase modulation. *Opt Lett* 2009; 34: 1456-1458.
- [41] Khonina SN, Porfirev AP. 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons. *Appl Phys B* 2018; 124: 191. DOI: 10.1007/s00340-018-7060-4.
- [42] Syubaev S, Zhizhchenko A, Vitrik O, Porfirev A, Fomchenko S, Khonina S, Kudryashov 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.
- [43] Mukina LS, Nazarov MM, Shkurinov AP. Propagation of THz plasmon pulse on corrugated and flat metal surface. *Surf Sci* 2006; 600(20): 4771-4776.

#### Author's information

**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).

**Oleg Eduardovich Kameshkov**, Graduate student of Novosibirsk State University. Research interests: physical optics, quantum optics, terahertz radiation. E-mail: [o.kameshkov@g.nsu.ru](mailto:o.kameshkov@g.nsu.ru).

**Alexey Konstantinovich Nikitin**, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Scientific and Technical Center for Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher at the Research Laboratory of Applied Electrodynamics, Novosibirsk State University. Research interests: plasmonics. E-mail: [alnikitin@mail.ru](mailto:alnikitin@mail.ru).

**Vladimir Sergeevich Pavelyev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering department of 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).

**Yuliya Yuryevna Choporova**, PhD, Senior Researcher at the Institute of Nuclear Physics named after G.I. Budker SB RAS, senior researcher Research Laboratory of Applied Electrodynamics, Novosibirsk State University. Research interests: optics, spectroscopy, holography, terahertz radiation. E-mail: [yu.yu.choporova@inp.nsk.su](mailto:yu.yu.choporova@inp.nsk.su).

Received October 22, 2019. The final version – November 22, 2019.