

Расчёт, изготовление и исследование субволнового аксикона для поляризационного преобразования излучения терагерцового диапазона

С.Н. Хонина^{1,2}, К.Н. Тукмаков^{1,2}, С.А. Дегтярев^{1,2}, А.С. Решетников¹,
В.С. Павельев^{1,2}, Б.А. Князев^{1,3,4}, Ю.Ю. Чопорова^{1,3,4}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

³ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия,

⁴ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Россия

Аннотация

Расчитан, изготовлен и исследован методами численного и натурального экспериментов субволновый аксикон для преобразования линейно-поляризованного излучения терагерцового диапазона в цилиндрически поляризованный пучок. В ходе экспериментов, поставленных на рабочей станции Новосибирского лазера на свободных электронах, показана эффективность созданного кремниевого элемента для выполнения поляризационного преобразования.

Ключевые слова: субволновый аксикон, поляризационное преобразование, лазер на свободных электронах, терагерцовое излучение.

Цитирование: Хонина, С.Н. Расчёт, изготовление и исследование субволнового аксикона для поляризационного преобразования излучения терагерцового диапазона / С.Н. Хонина, К.Н. Тукмаков, С.А. Дегтярев, А.С. Решетников, В.С. Павельев, Б.А. Князев, Ю.Ю. Чопорова // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 756-764. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-756-764.

Введение

Появление новых источников в терагерцовом диапазоне, в том числе мощных, таких как лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) [1], требует развития и совершенствования соответствующей элементной базы для управления пучками такого излучения. Значительное количество работ [2–4] посвящено созданию линз и дифракционных решёток терагерцового диапазона, однако эффективное применение когерентного терагерцового излучения требует создания элементов с более широкими функциональными возможностями, в частности, во многих приложениях необходима фокусировка пучка в заданные двух- и трёхмерные области, в других приложениях необходимо иметь возможность управления поперечно-модовым составом и поляризационными свойствами формируемого пучка. В случае создания элементов для управления мощными пучками большое значение имеет выбор материала подложки. В работе [5] показано, что применение полимерных элементов для этих целей ограничено в силу их невысокой лучевой стойкости. В [4] приведены результаты исследования силовых бинарных линз и делителей пучка терагерцового диапазона, изготовленных с помощью технологии однократного травления подложки из высокоомного кремния. После формирования дифракционного микрорельефа на одной из сторон подложки на обе поверхности элемента наносилось антиотражающее покрытие [4]. Исследование изготовленных элементов [4] показало их высокую лучевую стойкость (свыше 4 кВт/см²), однако они обладали невысокой энергетической эффективностью в силу бинарного (двухуровневого) дифракционного микрорельефа (теоретическая оценка для энергетической эффективности бинарной дифракционной линзы, напри-

мер, составляет 41% [6]). В [7] приведены результаты исследования бинарного кремниевого элемента, предназначенного для фокусировки Гауссова пучка терагерцового лазера в квадрат и изготовленного с помощью технологии, описанной в [4]. В работе [8] приведены результаты исследования кремниевых бинарных элементов, предназначенных для формирования одномодовых пучков Гаусса–Эрмита и Гаусса–Лагерра из освещающего Гауссова пучка мощного терагерцового лазера на свободных электронах. В работе [9] приведены результаты исследования элементов, предназначенных для формирования одномодовых бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом. Однако в работах [8, 9] речь идёт об изменении поперечно-модового состава пучка без изменения поляризационного состояния освещающего пучка. В то же время ряд актуальных приложений требует формирования пучков с заданным поперечно-модовым составом и заданным поляризационным состоянием [10]. К таким приложениям относятся лидары (формирование пучков, устойчивых к распространению в дисперсионных и турбулентных средах [11]), системы связи с поперечно-модовым уплотнением [12–15], лазерная обработка материалов [16–18] и микроструктурирование [19, 20], задачи сверхразрешения [21–25] и возбуждения плазмонных волноводов [26].

Для решения задачи одновременного управления поперечно-модовым составом и поляризационным состоянием формируемого когерентного терагерцового пучка в данной работе предложено использовать микрорельеф с существенно субволновым характерным размером зон.

В работах [27, 28] было продемонстрировано эффективное применение тонких (толщиной порядка

100 нм) субволновых решёток для поляризационного преобразования мощного излучения CO₂ лазера с длиной волны 10,6 мкм. Сочетание субволнового рельефа с дополнительным структурированием зон оптического элемента позволяет осуществлять поляризационно-фазовую модуляцию падающего пучка [29–31]. Скачок фазы на π в таких металлинзах осуществляется путём расположения субволновых решёток под углом в 90° в соседних зонах Френеля.

Субволновый аксикон (кольцевая решётка с периодом меньше длины волны) также представляет собой метаповерхность, которая позволяет выполнять преобразование линейно-поляризованного излучения в цилиндрически поляризованное [31].

В данной работе был рассчитан, изготовлен и исследован методами численного и натурального экспериментов кремниевый субволновый аксикон для преобразования линейно-поляризованного излучения терагерцового диапазона в цилиндрически-поляризованный пучок.

1. Расчёт субволнового аксикона

Как правило, дифракционные аксиконы используются для формирования бездифракционных пучков [32], поперечный размер которых практически не меняется на значительном расстоянии вдоль оптической оси. При уменьшении периода аксикона, что соответствует увеличению числовой апертуры оптического элемента, уменьшается поперечный размер формируемого пучка [33]. В этом случае фактически обеспечивается острая фокусировка и генерация мощной продольной компоненты электрического поля лазерного излучения [34]. Однако описанные эффекты имеют место при уменьшении периода лишь до размера длины волны, т.е. когда числовая апертура аксикона не превышает предельного значения для распространяющихся волн. Когда период аксикона становится меньше длины волны, а числовая апертура выше предельной, энергия падающего на элемент излучения перераспределяется в затухающие волны [35]. Дальнейшее уменьшение периода (увеличение числовой апертуры) приводит к качественно иным эффектам [36, 37].

Исследования, выполненные в статье [31], показывают, что субволновой аксикон может быть использован для преобразования линейно-поляризованного пучка в радиально-поляризованный пучок второго порядка. Пучки с таким типом поляризации при острой фокусировке обеспечивают эффективное формирование обратного потока энергии в фокальной области [31, 38, 39].

В работе проведено численное моделирование прохождения Гауссова пучка через субволновой аксикон на основе решения уравнений Максвелла методом конечных элементов, реализованных в программном пакете Comsol Multiphysics. Результаты расчёта представлены на рис. 1. Гауссов пучок с длиной волны 129 мкм освещает аксикон с периодом 60 мкм и высотой рельефа 50 мкм. Радиус расчётной области в численном эксперименте выбирался рав-

ным 580 мкм. Выбранный размер расчётной области был достаточен для анализа поперечной структуры формируемого пучка. Показатель преломления материала подложки аксикона (кремний) для данной длины волны $n = 3,452 + 0,386i$.

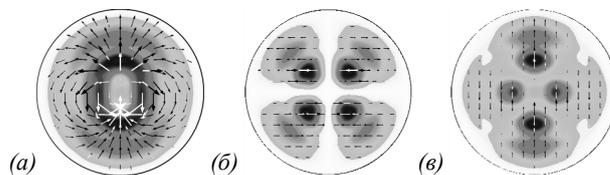


Рис. 1. Результаты численного моделирования прохождения Гауссова пучка с вертикальной линейной поляризацией через субволновой аксикон: распределение амплитуды и поляризации сформированного радиально-поляризованного пучка (а); распределение сформированного пучка при горизонтальном (ортогональном) (б) и вертикальном (в) положении поляризатора-анализатора

Таким образом, численное моделирование предсказывает возможность эффективного формирования радиально-поляризованного пучка, в том числе в терагерцовом диапазоне.

2. Технология формирования субволнового дифракционного микро рельефа

Для производства эффективных ДОЭ терагерцового диапазона, работающих с высокоэнергетическими пучками (например, лазерами на свободных электронах), в качестве исходного материала необходимо использовать нелегированный высокоомный кремний оптического качества типа (HRFZ-Si) [40]. В данной работе были использованы кремниевые подложки диаметром 50 мм и толщиной 1 мм с двухсторонней полировкой оптического качества.

Технологический маршрут производства ДОЭ состоит из следующих операций (рис. 2): а) подготовка кремниевой пластины (отмывка и контроль параметров), б) и в) создание защитной маски, г) травление кремния, д) удаление остатков металлической маски.

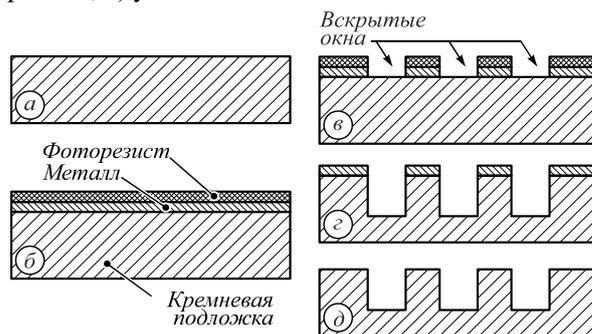


Рис. 2. Этапы изготовления ДОЭ: подготовка пластины (а); нанесение металлического и фоторезистивного слоя (б); экспонирование фоторезиста и жидкостное травление низлегающего слоя металла (в); травление кремния (г); удаление металлической маски (д)

Из-за необходимости получения профиля микро рельефа ДОЭ большой высоты, с соотношением высоты элементов травления к их ширине более единицы ($AR = 50/30$) и с малым отклонением стенок от

вертикали, для микроструктурирования необходимо применять реактивно-ионное травление (РИТ, RIE), так как жидкостное травление кремния с получением вертикальных стенок возможно лишь в особых случаях [41]. Применение РИТ для получения микро рельефа такой глубины не позволяет использовать фоторезистивную маску как защитный материал из-за низкой плазмостойкости. Поэтому в данной работе применялись плазмостойкие металлические маски.

Для получения такой маски на кремниевую подложку необходимо нанести тонкую плёнку металла и уже в ней средствами литографии вскрыть «окна», через которые будет производиться травление. Для получения в маске «окон» с размерами, характерными для элементов микро рельефа данных ДОЭ, достаточно возможностей самого простого из методов литографии – фотолитографии.

3. Технологический маршрут

3.1. Подготовка подложки

Отмывка пластин производилась по методике RCA: пластины помещались в разогретый до 60 °С раствор $H_2SO_4:H_2O_2$ 2:1 на 10 минут и далее – в слабый раствор плавиковой кислоты $HF:H_2O$ 1:20 на 10 секунд для удаления естественного слоя оксида на поверхностях пластины. Сушка пластин производилась обдувом осушенным воздухом.

3.2. Металлизация пластины

Следующим этапом производства является нанесение металлического покрытия, которое в данном случае выполнялось с помощью магнетронного распыления (PVD). Материал маски должен обеспечивать высокую селективность при РИТ по отношению к кремнию. В данной работе для травления кремния использовался Bosch-процесс [42], который включает применение реакционных газов SF_6 и C_4F_8 , поэтому для защиты нетравимых областей кремния использовались маски на основе алюминиевой плёнки. Выбор алюминия обоснован следующими соображениями:

- 1) очень высокая устойчивость во фторсодержащей плазме и плазме кислорода – высокая селективность к кремнию;
- 2) очень низкая эрозия краёв маски в плазме – отсутствие закруглений в верхней части структур;
- 3) высокая адгезия к кремнию – нет необходимости использования подслоя;
- 4) наличие жидкостного травителя с низким уровнем подтравы под фоторезистивную маску, обеспечивающим высокую устойчивость последней – высокое качество прямого литографического процесса;
- 5) высокая скорость распыления PVD-методом.

Процесс нанесения алюминиевой плёнки производился на установке «ЭТНА-100-МТ» (НТ-МДТ, Россия) при температуре подложки 100 °С в атмосфере аргона с давлением 1,2 Торр с использованием ионного ассистирования и вращения подложки. Такой режим обеспечивал отсутствие коронных разрядов магнетронов, а также удовлетворительную равномерность и вы-

сокую адгезию и зеркальность получаемой плёнки. В выбранном режиме травления должна обеспечиваться селективность травления 500÷1000, поэтому для выполнения травления заданной глубины с учётом запаса выбрана толщина маски 150 нм.

3.3. Получение твёрдой маски

После нанесения металлического покрытия производилось нанесение слоя позитивного фоторезиста ФП-051Ки, который обеспечивает получение минимальных размеров элементов менее 0,6 мкм. Нанесение тонкого слоя (порядка 0,2 мкм) фоторезиста производилось с помощью центрифугирования при 3200 об/мин в течение 60 секунд при комнатной температуре подложки. Сушка производилась контактным методом на нагревательном столике при температуре 115 °С в течение 60 секунд. Экспонирование фотослоя производилось через пластиковый фотошаблон излучением от светодиодной лампы с длиной волны 405 нм и мощностью 6 Вт в течение 30 секунд. Проявление рисунка осуществлялось с помощью проявителя УПФ-1Б в течение 20 секунд.

Травление алюминиевой плёнки производилось непосредственно сразу после процесса проявления фоторезиста и промывки в деионизованной воде. Процесс травления проводился в смеси $H_3PO_4:HNO_3:CH_3COOH:DI$ 73:3:3:10 при комнатной температуре в течение 90 секунд.

3.4. РИТ кремния

После подготовки твёрдой маски следовала операция травления кремния, которая выполнялась на установке «ЭТНА-100-ПТ» (НТ-МДТ, Россия). Для получения заданных рабочих характеристик ДОЭ необходимо обеспечить угол отклонения стенок от вертикали не более 10°, поэтому был использован Bosch-процесс в индуктивно-связанной конфигурации источника плазмы (ICP-RIE) [43, 44] в атмосфере C_4F_8/Ar (стадия пассивации) и SF_6/Ar (стадия травления). Параметры подбирались для обеспечения оптимальной скорости травления (на уровне 0,5 мкм/мин), малого угла отклонения от вертикали (менее 5°), малого подтравы под маску (изменение ширины элементов не более 1 мкм) и приемлемого качества поверхности стенок.

На этапе травления алюминиевой маски возникла сложность контроля окончания процесса травления из-за того, что рисунок изготавливаемого ДОЭ покрывает почти всю площадь подложки и не оставлено окно для визуального контроля травления. Поэтому для ликвидации очень тонкого слоя остатков алюминиевой плёнки во вскрытых окнах было применено плазменное травление в атмосфере O_2/Ar 60/20 sccm в течение 45 секунд с повышенным уровнем напряжения смещения (120 В).

Давление в реакторе было около 0,02 мБар и зависело от стадии цикла травления, откачка реактора осуществлялась турбомолекулярным насосом, что обеспечивало быстрое обновление реакционной атмосферы. Во всех циклах травления использовалась до-

бавка ионообразующего инертного газа аргона (10 sccm). Расход C_4F_8 был на уровне 100 sccm, расход SF_6 – на уровне 60 sccm. Мощность ИСР-источника индуктора была 200 Вт, частота – 13,56 МГц. Ускоряющий источник работал только на стадии травления и только в режиме регуляции автосмещения потенциала подложки (constant DC-Bias) 80 В, при этом его мощность не превышала 4 Вт, частота источника – 13,56 МГц, параметры согласования были зафиксированы. Глубина травления за один цикл при этом составляла 50-60 нм. Общая глубина травления задавалась количеством циклов. После достижения глубины травления 30 мкм (оценивалась по количеству циклов) производилось увеличение доли времени пассивации в цикле травления, что устраняло дефекты неравномерной пассивации стенок структур, вызванных неидеальностью конструкции реактора и расположения подложки [44]. Поэтому длительность циклов подбиралась для обеспечения вертикальности стенок и составила от 2,5 до 3,5 секунд для фазы пассивации и 2 секунды для фазы травления. После выполнения циклического травления выполнялась кратковременная «зачистка» поверхности в атмосфере SF_6 в изотропном режиме травления [43].

4. Контроль геометрических параметров микрорельефа

Контроль геометрических параметров получаемых ДОЭ осуществлялся методами интерферометрии белого света (WLI-DMR, рис. 3) и средствами растровой электронной микроскопии (FEI Quanta-200, рис. 4). Интерферометрия использовалась как экспресс-средство контроля глубины протравки и качества дна. Контроль методом РЭМ использовался для оценки качества стенок, дна и определения геометрических размеров получаемых элементов микрорельефа.

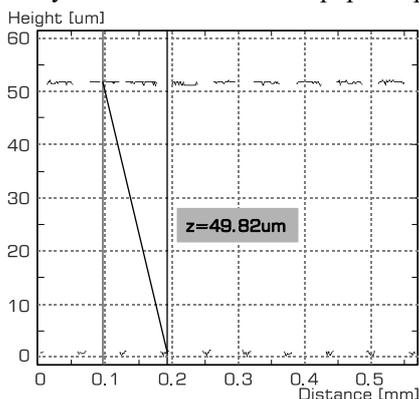


Рис. 3. Профилограмма ДОЭ в центральной области (интерферометр белого света)

5. Исследование субволнового аксикона

Изготовленный элемент был исследован, используя излучение Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ). Схема эксперимента показана на рис. 5. Элемент освещался линейно поляризованным Гауссовым пучком с модовым радиусом $\sigma = 11$ мм. Длина волны излучения составляла $\lambda = 128,7$ мкм.

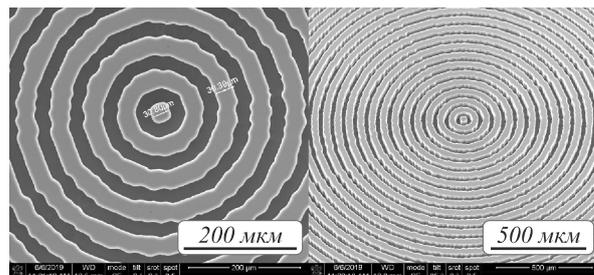


Рис. 4. РЭМ изображение полученного ДОЭ (FEI Quanta-200)

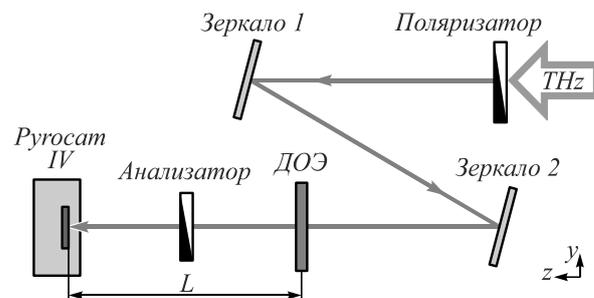


Рис. 5. Схема эксперимента

Во время экспериментов поляризация исходного пучка устанавливалась с помощью проволочного поляризатора. Вектор электрического поля был направлен вдоль оси x . Пучок проходил через ДООЭ; изображение прошедшего пучка записывалось матричным пьезоэлектрическим приёмником Pyrosam IV. Размер матрицы – 320×320 пикселей, размер одного элемента – 80 мкм. Полный размер изображения – $25,6 \times 25,6$ мм². Изображения регистрировались на двух расстояниях от ДООЭ. Для каждого расстояния снимались три кадра: (1) в отсутствие анализатора, (2) с анализатором, пропускающим электромагнитное поле с ортогональным исходной поляризации направлением, и (3) с анализатором, пропускающим электромагнитное поле сонаправлено исходной поляризации. Результаты оптических экспериментов приведены в табл. 1, 2. Значения угла поляризации в таблицах соответствуют делениям шкалы на оправе поляризатора-анализатора. Результаты, представленные в табл. 1, 2, находятся в качественном соответствии с результатами численного моделирования (рис. 1). Имеющиеся расхождения между результатами численного моделирования и натурального эксперимента объясняются отклонениями реализованного дифракционного микрорельефа от расчётного. На рис. 4 видны неровные края зон, что объясняется недостатками использованной технологии изготовления фотошаблонов.

Заключение

Расчитан, изготовлен и исследован методами численного и натурального экспериментов кремниевый субволновый аксикон для преобразования линейно-поляризованного излучения терагерцового диапазона в цилиндрически поляризованный пучок. В ходе экспериментов, поставленных на рабочей станции Новосибирского лазера на свободных электронах, показав-

но эффективное преобразование поляризационного состояния пучка с помощью созданного элемента. Результаты численного моделирования и натурального эксперимента находятся во взаимном качественном соответствии. Имеющиеся расхождения между результатами численного моделирования и натурального эксперимента объясняются отклонениями реализованного дифракционного микрорельефа от расчётного. В случае повышения качества изготовления мик-

рорельефа, например, за счёт изготовления фотошаблонов с более высоким пространственным разрешением, можно будет получить экспериментальные результаты, имеющие меньшее расхождение с результатами численного моделирования.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (грант № 19-72-20202).

Табл. 1. Результаты оптического эксперимента

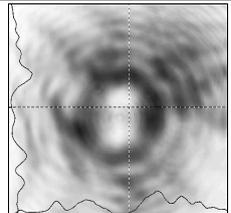
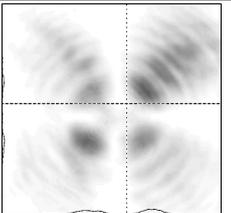
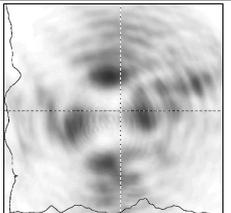
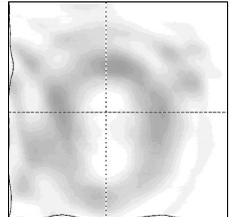
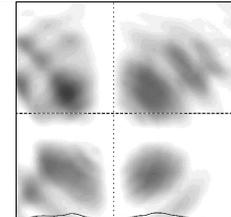
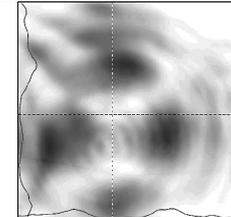
№	1	2	3
Анализатор	нет	ортогональное положение (-90°)	сонаправленное положение (0°)
L , мм	122	122	122
Изображение			

Табл. 2. Результаты оптического эксперимента

№	4	5	6
Анализатор	нет	ортогональное положение (-90°)	сонаправленное положение (0°)
L , мм	302	302	302
Изображение			

Литература

- Kulipanov, G.N.** Novosibirsk free electron laser-facility description and recent experiments / G.N. Kulipanov, E.G. Bagryanskaya, E.N. Chesnokov, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, Ya.V. Getmanov, S.L. Kiselev, B.A. Knyazev, V.V. Kubarev, S.E. Peltek, V.M. Popik, T.V. Salikova, M.A. Scheglov, S.S. Seredniakov, O.A. Shevchenko, A.N. Skrinisky, S.L. Veber, N.A. Vinokurov // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2015. – Vol. 5, Issue 5. – P. 798-809. – DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2453121.
- Walsby, E.D.** Multilevel silicon diffractive optics for terahertz waves / E.D. Walsby, S. Wang, J. Xu, T. Yuan, R. Blaikie, S.M. Durbin, X.-C. Zhang, D.R.S. Cumming // *Journal of Vacuum Science and Technology B*. – 2002. – Vol. 20, Issue 6. – 2780.
- Furlan, W.D.** 3D printed diffractive terahertz lenses / W.D. Furlan, V. Ferrando, J.A. Monsoriu, P. Zagrajek, E. Czerwinska, M. Szustakowski // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, Issue 8. – P. 1748-1751. – DOI: 10.1364/OL.41.001748.
- Агафонов, А.Н.** Кремниевые дифракционные оптические элементы для мощного монохроматического терагерцового излучения / А.Н. Агафонов, Б.О. Володкин, А.К. Кавеев, Б.А. Князев, Г.И. Кропотов, В.С. Павельев, В.А. Соيفер, К.Н. Тукмаков, Е.В. Цыганкова, Ю.Ю. Чопорова // *Автометрия*. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 98-105.
- Князев, В.А.** Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: Comparative description of imaging techniques with examples of application / B.A. Knyazev, V.S. Cherkassky, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, M.G. Vlasenko, M.A. Dem'yanenko, D.G. Esaev // *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. – 2011. – Vol. 32, Issue 10. – P. 1207-1222.
- Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соифер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2007. – ISBN: 5-9221-0845-4.
- Агафонов, А.Н.** Кремниевая оптика для фокусировки лазерного излучения терагерцового диапазона в заданные двумерные области / А.Н. Агафонов, Б.О. Володкин, С.Г. Волоотовский, А.К. Кавеев, Б.А. Князев, Г.И. Кропотов, В.С. Павельев, К.Н. Тукмаков, Е.В. Цыганкова, Д.И. Цыпишка, Ю.Ю. Чопорова // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 464-470.
- Агафонов, А.Н.** Управление поперечно-модовым составом терагерцового лазерного излучения с помощью элементов бинарной кремниевой оптики / А.Н. Агафонов, Б.О. Володкин, А.К. Кавеев, Б.А. Князев, Г.И. Кропотов, В.С. Павельев, К.Н. Тукмаков, Ю.Ю. Чопорова // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 763-769.
- 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 // *Physics Review A*. – 2017. – Vol. 96. – 023846. – DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023846.
- Rubinsztein-Dunlop, H.** Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M.V. Berry, M.R. Dennis, D.L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, Ch. Alpmann,

- P. Banzer, T. Bauer, E. Karimi, L. Marrucci, M. Padgett, M. Ritsch-Marte, N.M. Litchinitser, N.P. Bigelow, C. Rosales-Guzmán, A. Belmonte, J.P. Torres, T.W. Neely, M. Baker, R. Gordon, A.B. Stilgoe, J. Romero, A.G. White, R. Fickler, A.E. Willner, G. Xie, B. McMorran, A.M. Weiner // *Journal of Optics*. – 2017. – Vol. 19, Issue 1. – 013001.
11. **Chen, R.** Statistical properties of a cylindrical vector partially coherent beam in turbulent atmosphere / R. Chen, Y. Dong, F. Wang, Y. Cai // *Applied Physics B*. – 2013. – Vol. 112. – P. 247-259.
 12. **Huang, H.** 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength / H. Huang, G. Xie, Y. Yan, N. Ahmed, Y. Ren, Y. Yue, D. Rogawski, M.J. Willner, B.I. Erkmen, K.M. Birnbaum, S.J. Dolinar, M.P.J. Lavery, M.J. Padgett, M. Tur, A.E. Willner // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39, Issue 2. – P. 197-200.
 13. **Milione, G.** Using the nonseparability of vector beams to encode information for optical communication / G. Milione, T.A. Nguyen, J. Leach, D.A. Nolan, R.R. Alfano // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, Issue 21. – P. 4887-4890.
 14. **Moreno, I.** Vector beam polarization state spectrum analyzer / I. Moreno, J.A. Davis, K. Badham, M.M. Sánchez-López, J.E. Holland, D.M. Cottrell // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7, Issue 1. – 2216.
 15. **Khonina, S.N.** Recognition of polarization and phase states of light based on the interaction of nonuniformly polarized laser beams with singular phase structures / S.N. Khonina, A.P. Porfirev, S.V. Karpeev // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, Issue 13. – P. 18484-18492. – DOI: 10.1364/OE.27.018484.
 16. **Kraus, M.** Microdrilling in steel using ultrashort pulsed laser beams with radial and azimuthal polarization / M. Kraus, M.A. Ahmed, A. Michalowski, A. Voss, R. Weber, T. Graf // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, Issue 21. – 22305.
 17. **Hnatovsky, C.** Polarization-dependent ablation of silicon using tightly focused femtosecond laser vortex pulses / C. Hnatovsky, V.G. Shvedov, N. Shostka, A.V. Rode, W. Krolikowski // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37, Issue 2. – P. 226-228.
 18. **Алфёров, С.В.** О возможности управления лазерной абляции при острой фокусировке фемтосекундного излучения / С.В. Алфёров, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, К.Н. Тукмаков, О.Ю. Моисеев, С.А. Шуляпов, К.А. Иванов, А.Б. Савельев-Трофимов // *Квантовая электроника*. – 2014. – Т. 44, № 11. – С. 1061-1065.
 19. **Omatsu, T.** Metal microneedle fabrication using twisted light with spin / T. Omatsu, K. Chujo, K. Miyamoto, M. Okida, K. Nakamura, N. Aoki, R. Morita // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, Issue 17. – P. 17967-17973.
 20. **Данилов, П.А.** Поляризационно-селективное возбуждение люминесценции красителя на золотой пленке структурированными ультракороткими лазерными импульсами / П.А. Данилов, И.Н. Сараева, С.И. Кудряшов, А.П. Порфирьев, А.А. Кучмижак, А.Ю. Жижченко, А.А. Руденко, С.Ф. Уманская, Д.А. Заярный, А.А. Ионин, С.Н. Хонина // *Письма в ЖЭТФ*. – Т. 107, Вып. 1-2. – С. 18-22. – DOI: 10.7868/S0370274X18010046.
 21. **Hell, S.W.** Breaking the diffraction resolution limit by stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy / S.W. Hell, J. Wichmann // *Optics Letters*. – 1994. – Vol. 19. – P. 780-782.
 22. **Török, P.** The use of Gauss-Laguerre vector beams in STED microscopy / P. Török, P.R.T. Munro // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12. – P. 3605-3617.
 23. **Нao, X.** Effects of polarization on the de-excitation dark focal spot in STED microscopy / X. Hao, C. Kuang, T. Wang, X. Liu // *Journal of Optics*. – 2010. – Vol. 12. – 115707.
 24. **Khonina, S.N.** Enlightening darkness to diffraction limit and beyond: comparison and optimization of different polarizations for dark spot generation / S.N. Khonina, I. Golub // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2012. – Vol. 29. – P. 1470-1474. – DOI: 10.1364/JOSAA.29.001470.
 25. **Khonina, S.N.** How low can STED go? Comparison of different write-erase beam combinations for stimulated emission depletion microscopy / S.N. Khonina, I. Golub // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2012. – Vol. 29, Issue 10. – P. 2242-2246. – DOI: 10.1364/JOSAA.29.001470.
 26. **Weibin, C.** Realization of an evanescent Bessel beam via surface plasmon interference excited by a radially polarized beam / C. Weibin, Q. Zhan // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34. – P. 722-724.
 27. **Bomzon, Z.** Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings / Z. Bomzon, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27. – P. 1141-1143.
 28. **Niv, A.** Propagation-invariant vectorial Bessel beams obtained by use of quantized Pancharatnam-Berry phase optical elements / A. Niv, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman // *Optics Letters*. – 2004. – Vol. 29. – P. 238-240.
 29. **Stafeev, S.S.** Subwavelength gratings for polarization conversion and focusing of laser light / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, M.V. Kotlyar, L. O'Faolain // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2017. – Vol. 27. – P. 32-41. – DOI: 10.1016/j.photonics.2017.09.001.
 30. **Degtyarev, S.A.** Sublinearly chirped metalenses for forming abruptly autofocusing cylindrically polarized beams / S.A. Degtyarev, S.G. Volotovskiy, S.N. Khonina // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2018. – Vol. 35, Issue 8. – P. 1963-1969. – DOI: 10.1364/JOSAB.35.001963.
 31. **Degtyarev, S.A.** Metasurfaces with continuous ridges for inverse energy flux generation / S.A. Degtyarev, D.A. Savelyev, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, Issue 11. – P. 15129-15135. – DOI: 10.1364/OE.27.015129.
 32. **Durnin, J.** Diffraction-free beams / J. Durnin, J.J. Miceli, J.H. Eberly // *Physical Review Letters*. – 1987. – Vol. 58, Issue 15. – P. 1499-1501.
 33. **Карпеев, С.В.** Высокоапертурный бинарный биаксикон для дальнего ИК-диапазона: изготовление и экспериментальное тестирование при линейной поляризации падающего излучения // С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, А.В. Волков, О.Ю. Моисеев, Г.Ф. Костюк, Д.М. Якуненкова // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*. – 2010. – Т. 4, Вып. 24. – С. 215-223.
 34. **Khonina, S.N.** High-aperture binary axicons for the formation of the longitudinal electric field component on the optical axis for linear and circular polarizations of the illuminating beam / S.N. Khonina, D.A. Savelyev // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2013. – Vol. 117, No. 4. – P. 623-630. – DOI: 10.1134/S1063776113120157.
 35. **Устинов, А.В.** Анализ дифракции лазерного излучения на аксиконе с числовой апертурой выше предельной / А.В. Устинов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 213-222.
 36. **Khonina, S.N.** Focused, evanescent, hollow, and collimated beams formed by microaxicons with different conical angles / S.N. Khonina, S.A. Degtyarev, D.A. Savelyev, A.V. Ustinov // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 16. – P. 19052-19064. – DOI: 10.1364/OE.25.019052.
 37. **Lalanne, P.** On the effective medium theory of subwavelength periodic structures / P. Lalanne, D. Lemerrier-Lalanne // *Journal of Modern Optics*. – 1996. – Vol. 43. – P. 2063-2085.

38. **Khonina, S.N.** Inverse flux of focused radially polarized optical beams / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.A. Degtyarev // *Physical Review A*. – 2018. – Vol. 98, Issue 4. – 043823. – DOI: 10.1103/PhysRevA.98.043823.
39. **Khonina, S.N.** Increased reverse energy flux area when focusing a linearly polarized annular beam with binary plates / S.N. Khonina, A.V. Ustinov // *Optics Letters*. – 2019. – Vol. 44, Issue 8. – P. 2008-2011. – DOI: 10.1364/OL.44.002008.
40. Silicon [Electronical Resource]. – URL: <http://www.tydexoptics.com/pdf/Si.pdf> (request date 11.09.2019).
41. Wet-chemical etching of silicon and SiO₂ [Electronical Resource]. – URL: http://www.microchemicals.eu/technical_information/silicon_etching.pdf (request date 11.09.2019).
42. **U.S. Patent 5,501,893 C25F 3/12, B44C 1/22, 428/161.** Method of Anisotropically Etching Silicon / F. Laermer, A. Schilp, filed of November 27, 1993, published of March 26, 1996.
43. **Jansen, H.** Black silicon method X: a review on high speed and selective plasma etching of silicon with profile control: an in-depth comparison between Bosch and cryostat DRIE processes as a roadmap to next generation equipment / H. Jansen, M. de Boer, S. Unnikrishnan, M. Louwerse, M.C. Elwenspoek // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2009. – Vol. 19. – P. 1-41.
44. **Ayon, A.A.** Characterization of a time multiplexed inductively coupled plasma etcher / A.A. Ayon // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1999. – Vol. 146, Issue 1. – P. 339-349.

Сведения об авторах

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@smr.ru.

Тукмаков Константин Николаевич, инженер кафедры нанотехнологий, научный сотрудник НОЦ нанотехнологий Самарского университета. Область научных интересов: производство микро- и наноструктур, технология фокусированных ионных пучков. E-mail: tukmakov.k@gmail.com.

Дегтярев Сергей Александрович, доцент Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва, научный сотрудник ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: волновая и сингулярная оптика. E-mail: sealek@gmail.com.

Решетников Антон Сергеевич, старший лаборант кафедры нанотехнологий Самарского университета. Область научных интересов: производство микро- и наноструктур. E-mail: ReshetnikovAntonio@yandex.ru.

Павельев Владимир Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой нанотехнологий Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур. E-mail: nano@ssau.ru.

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.

Чопорова Юлия Юрьевна, 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, лазеры, терагерцовое излучение. E-mail: yu.yu.choporova@inp.nsk.su.

ГРПТИ: 29.33.17

Поступила в редакцию 04 сентября 2019 г. Окончательный вариант – 13 сентября 2019 г.

Design, fabrication and investigation of a subwavelength axicon for terahertz beam polarization transforming

S.N. Khonina^{1,2}, K.N. Tukmakov^{1,2}, S.A. Degtyarev^{1,2}, A.S. Reshetnikov¹, V.S. Pavelyev^{1,2},
B.A. Knyazev^{1,3,4}, Yu.Yu. Choporova^{1,3,4}

¹ Samara National Research University, 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse 34,

² IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,

Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia,

³ Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS, Novosibirsk, Russia,

⁴ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Abstract

A silicon subwavelength axicon for terahertz beam polarization transforming has been designed, fabricated, and investigated by methods of numerical and optical experiments. The research has been performed on a free-electron laser workstation NOVOFEL (Budker Institute of

Nuclear Physics of SB RAS, Novosibirsk). Experimental studies have shown the effective polarization conversion performed by the created silicon element.

Keywords: subwavelength axicon, polarization conversion, free electron laser, terahertz radiation.

Citation: Khonina SN, Tukmakov KN, Degtyarev SA, Reshetnikov AS, Pavelyev VS, Knyazev BA, Choporova YuYu. Design, fabrication and investigation of a subwavelength axicon for terahertz beam polarization transforming. *Computer Optics* 2019; 43(5): 756-764. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-756-764.

Acknowledgements: This work was financially supported by the Russian Science Foundation under RSF grant No. 19-72-20202.

References

- [1] Kulipanov GN, Bagryanskaya EG, Chesnokov EN, Choporova YuYu, Gerasimov VV, Getmanov YaV, Kiselev SL, Knyazev BA, Kubarev VV, Peltek SE, Popik VM, Salikova TV, Scheglov MA, Seredniakov SS, Shevchenko OA, Skrinsky AN, Veber SL, Vinokurov NA. Novosibirsk free electron laser-facility description and recent experiments. *IEEE transactions on terahertz science and technology* 2015; 5(5): 798-809. DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2453121.
- [2] Walsby ED, Wang S, Xu J, Yuan T, Blaikie R, Durbin SM, Zhang X-C, Cumming DRS. Multilevel silicon diffractive optics for terahertz waves. *J Vac Sci Technol B* 2002; 20(6): 2780.
- [3] Furlan WD, Ferrando V, Monsoriu JA, Zagrajek P, Czerwinska E, Szustakowski M. 3D printed diffractive terahertz lenses. *Opt Lett* 2016; 41(8): 1748-1751. DOI: 10.1364/OL.41.001748.
- [4] 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; 2(49): 189-195. DOI: 10.3103/S875669901302012X.
- [5] Knyazev BA, Cherkassky VS, Choporova YuYu, Gerasimov VV, Vlasenko MG, Dem'yanenko MA, Esaev DG. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: Comparative description of imaging techniques with examples of application. *J Infrared Milli Terahz Waves* 2011; 32(10): 1207-1222.
- [6] Soifer VA, ed. *Methods for computer design of diffractive optical elements*. New York: John Wiley and Sons Inc; 2002. ISBN: 978-0-471-09533-0.
- [7] Agafonov AN, Volodkin BO, Volotovskiy SG, Kaveev AK, Knyazev BA, Kropotov GI, Pavel'ev VS, Tukmakov KN, Tsygankova EV, Tsyppishka DI, Choporova YuYu. Silicon optics for focusing of terahertz laser radiation in a given two-dimensional domain. *Computer Optics* 2013; 37(4): 464-470.
- [8] Agafonov AN, Choporova YuYu, Kaveev AK, Knyazev BA, Kropotov GI, Pavel'ev VS, Tukmakov KN, Volodkin BO. Control of transverse mode spectrum of Novosibirsk free electron laser radiation. *Appl Opt* 2015; 54: 3635-3639.
- [9] 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: 023846. DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023846.
- [10] Rubinsztein-Dunlop H, Forbes A, Berry MV, Dennis MR, Andrews DL, Mansuripur M, Denz C, Alpmann Ch, Banzer P, Bauer T, Karimi M, Marrucci L, Padgett M, Ritsch-Marte M, Litchinitser NM, Bigelow NP, Rosales-Guzmán C, Belmonte A, Torres JP, Neely TW, Baker M, Gordon R, Stilgoe AB, Romero J, White AG, Fickler R, Willner AE, Xie G, McMorran B, Weiner AM. Roadmap on structured light. *J Opt* 2017; 19(1): 013001.
- [11] Chen R, Dong Y, Wang F, Cai Y. Statistical properties of a cylindrical vector partially coherent beam in turbulent atmosphere. *Appl Phys B* 2013; 112: 247-259.
- [12] Huang H, Xie G, Yan Y, Ahmed N, Ren Y, Yue Y, Rogawski D, Willner MJ, Erkmen BI, Birnbaum KM, Dolinar SJ, Lavery MPJ, Padgett MJ, Tur M, Willner AE. 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength. *Opt Lett* 2014; 39(2): 197-200.
- [13] Milione G, Nguyen TA, Leach J, Nolan DA, Alfano RR. Using the nonseparability of vector beams to encode information for optical communication. *Opt Lett* 2015; 40(21): 4887-4890.
- [14] Moreno I, Davis JA, Badham K, Sánchez-López MM, Holland JE, Cottrell DM. Vector beam polarization state spectrum analyzer. *Sci Rep* 2017; 7(1): 2216.
- [15] Khonina SN, Porfirev AP, Karpeev SV. Recognition of polarization and phase states of light based on the interaction of nonuniformly polarized laser beams with singular phase structures. *Opt Express* 2019; 27(13): 18484-18492. DOI: 10.1364/OE.27.018484.
- [16] Kraus M, Ahmed MA, Michalowski A, Voss A, Weber R, Graf T. Microdrilling in steel using ultrashort pulsed laser beams with radial and azimuthal polarization. *Opt Express* 2010; 18(21): 22305.
- [17] Hnatovsky C, Shvedov VG, Shostka N, Rode AV, and Krolikowski W. Polarization-dependent ablation of silicon using tightly focused femtosecond laser vortex pulses. *Opt Lett* 2012; 37(2): 226-228.
- [18] Alferov SV, Karpeev SV, Khonina SN, Tukmakov KN, Moiseev OYu, Shulyapov SA, Ivanov KA, Savel'ev-Trofimov AB. On the possibility of controlling laser ablation by tightly focused femtosecond radiation. *Quantum Electronics* 2014; 44(11): 1061-1065. DOI: 10.1070/QE2014v044n11ABEH015471.
- [19] Omatsu T, Chujo K, Miyamoto K, Okida M, Nakamura K, Aoki N, Morita R. Metal microneedle fabrication using twisted light with spin. *Opt Express* 2010; 18(17): 17967-17973.
- [20] Danilov PA, Saraeva IN, Kudryashov SI, Porfirev AP, Kuchmizhak AA, Zhizhchenko AYU, Rudenko AA, Uman-skaya SF, Zayamy DA, Ionin AA, Khonina SN. Polarization-selective excitation of dye luminescence on a gold film by structured ultrashort laser pulses. *JETP Letters* 2018; 107(1): 15-18. DOI: 10.1134/S0021364018010034.
- [21] Hell SW and Wichmann J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy. *Opt Lett* 1994; 19: 780-782.
- [22] Török P, Munro PRT. The use of Gauss-Laguerre vector beams in STED microscopy. *Opt Express* 2004; 12: 3605-3617.
- [23] Hao X, Kuang C, Wang T, Liu X. Effects of polarization on the de-excitation dark focal spot in STED microscopy. *J Opt* 2010; 12: 115707.
- [24] Khonina SN, Golub I. Enlightening darkness to diffraction limit and beyond: comparison and optimization of different polarizations for dark spot generation. *J Opt Soc Am A* 2012; 29: 1470-1474. DOI: 10.1364/JOSAA.29.001470.
- [25] Khonina SN, Golub I. How low can STED go? Comparison of different write-erase beam combinations for stimulated emission depletion microscopy. *J Opt Soc Am A* 2012; 29(10): 2242-2246. DOI: 10.1364/JOSAA.29.001470.

- [26] Weibin C, Zhan Q. Realization of an evanescent Bessel beam via surface plasmon interference excited by a radially polarized beam. *Opt Lett* 2009; 34: 722-724.
- [27] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, and Hasman E. Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings. *Opt Lett* 2002; 27: 1141-1143.
- [28] Niv A, Biener G, Kleiner V, Hasman E. Propagation-invariant vectorial Bessel beams obtained by use of quantized Pancharatnam-Berry phase optical elements. *Opt Lett* 2004; 29: 238-240.
- [29] Stafeev SS, Kotlyar VV, Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L. Subwavelength gratings for polarization conversion and focusing of laser light. *Photon Nanostructures* 2017; 27: 32-41. DOI: 10.1016/j.photonics.2017.09.001.
- [30] Degtyarev SA, Volotovskiy SG, Khonina SN. Sublinearly chirped metalenses for forming abruptly auto-focusing cylindrically polarized beams. *J Opt Soc Am B* 2018; 35(8): 1963-1969. DOI: 10.1364/JOSAB.35.001963.
- [31] Degtyarev SA, Savelyev DA, Khonina SN, and Kazanskiy NL. Metasurfaces with continuous ridges for inverse energy flux generation. *Opt Express* 2019; 27(11): 15129-15135. DOI: 10.1364/OE.27.015129.
- [32] Durnin J, Miceli JJ, Eberly JH. Diffraction-free beams. *Phys Rev Lett* 1987; 58(15): 1499-1501.
- [33] Karpeev SV, Khonina SN, Volkov AV, Moiseev OYu, Kostyuk GF, Yakunenkova DM. High-aperture binary bi-axicon for far IR light: Fabrication and experimental testing using linearly polarized incident light [In Russian]. *Herald of Samara State Aerospace University named by S.P. Korolyev* 2010; 4(24): 215-223.
- [34] Khonina SN, Savelyev DA. High-aperture binary axicons for the formation of the longitudinal electric field component on the optical axis for linear and circular polarizations of the illuminating beam. *JETP* 2013; 117(4): 623-630. DOI: 10.1134/S1063776113120157.
- [35] Ustinov AV, Khonina SN. Analysis of laser beam diffraction by axicon with the numerical aperture above limiting. *Computer Optics* 2014; 38(2): 213-222.
- [36] Khonina SN, Degtyarev SA, Savelyev DA, Ustinov AV. Focused, evanescent, hollow, and collimated beams formed by microaxicons with different conical angles. *Opt Express* 2017; 25(16): 19052-19064. DOI: 10.1364/OE.25.019052.
- [37] Lalanne P, Lemerrier-Lalanne D. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures. *J Mod Opt* 1996; 43: 2063-2085.
- [38] Khonina SN, Ustinov AV, Degtyarev SA. Inverse energy flux of focused radially polarized optical beams. *Physical Review A* 2018; 98: 043823. DOI: 10.1103/PhysRevA.98.043823.
- [39] Khonina SN, Ustinov AV. Increased reverse energy flux area when focusing a linearly polarized annular beam with binary plates. *Optics Letters* 2019; 44(8): 2008-2011. DOI:10.1364/OL.44.002008.
- [40] Silicon. Source: (<http://www.tydexoptics.com/pdf/Si.pdf>).
- [41] Wet-chemical etching of silicon and SiO₂. Source: (http://www.microchemicals.eu/technical_information/silicon_etching.pdf).
- [42] Laermer F, Schilp A. Method of anisotropically etching silicon, Pat USA 5501893 of March 26, 1996.
- [43] Jansen H, de Boer M, Unnikrishnan S, Louwse M, Elwenspoek MC. Black silicon method X: a review on high speed and selective plasma etching of silicon with profile control: an in-depth comparison between Bosch and cryostat DRIE processes as a roadmap to next generation equipment. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 2009; 19: 1-41.
- [44] Ayon AA. Characterization of a time multiplexed inductively coupled plasma etcher. *Journal of the Electrochemical Society* 1999; 146(1): 339-349.

Author's information

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Chief researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: khonina@smr.ru.

Konstantin Nikolaevich Tukmakov, engineer of Nanoengineering department, researcher of REC “Nanotechnology” of Samara University. Research interests: fabrication of micro- and nanostructures, technology focused ion beams. E-mail: tukmakov.k@gmail.com.

Sergey Alexandrovich Degtyarev, docent of Samara National Research University, research fellow of the Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: wave optics. E-mail: sealek@gmail.com.

Anton Sergeevich Reshetnikov, senior laboratory assistant of Nanoengineering department of Samara University. Research interests: fabrication of micro- and nanostructures. E-mail: ReshetnikovAntonio@yandex.ru.

Vladimir Sergeevich Pavelyev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering department of Samara University, chief researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, optical metamaterials synthesis, technologies for forming of micro- and nanostructures. E-mail: nano@ssau.ru.

Boris Aleksandrovich Knyazev, Doctor in Physics and Math, chief researcher at the 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.

Yulia Yuryevna Choporova, Candidate in Physics and Math, Senior Researcher at the Institute of Nuclear Physics named after G.I. Budker, Senior Researcher at Research Laboratory of Applied Electrodynamics, Novosibirsk State University. Research interests: optics, lasers, terahertz radiation. E-mail: yu.yu.choporova@inp.nsk.su.

Received September 04, 2019. The final version – September 13, 2019.