

Кремниевые субволновые аксиконы для преобразования поляризационного состояния терагерцовых пучков

В.С. Павельев^{1,2}, С.А. Дегтярев^{1,2}, К.Н. Тукмаков^{1,2}, А.С. Решетников²,
Б.А. Князев^{2,3,4}, Ю.Ю. Чопорова^{2,3,4}

¹Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

³Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, академика Лаврентьева 11, Новосибирск, Россия, 630090

⁴Новосибирский государственный университет, Пирогова 2, Новосибирск, Россия, 630090

Аннотация. Исследован дифракционный оптический элемент (ДОЭ) для преобразования линейно-поляризованного излучения терагерцового диапазона в цилиндрически-поляризованный пучок. Методами численного эксперимента определена оптимальная высота дифракционного микрорельефа. Рассмотрены перспективы применения таких элементов в телекоммуникационных системах терагерцового диапазона.

1. Введение

Появление новых источников терагерцового диапазона, в том числе мощных, таких как лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) [1], требует создания элементов для управления пучками такого излучения. Работы [2–7] посвящены созданию элементов дифракционной оптики терагерцового диапазона. В ряде приложений дифракционные оптические элементы (ДОЭ) использовались для фокусировки терагерцового лазерного пучка [2-5], в других приложениях - для управления поперечно-модовым составом пучка [6-7]. В работах [6-7] приведены результаты исследования кремниевых бинарных элементов, предназначенных для формирования одномодовых пучков Гаусса–Эрмита, Гаусса–Лагерра и Бесселя из освещающего пучка мощного терагерцового лазера на свободных электронах. Однако в работах [6,7] речь идёт лишь об изменении поперечно-модового состава без изменения поляризационного состояния освещающего пучка. В то же время ряд актуальных приложений лазерного излучения требует одновременного управления поперечно-модовым составом и поляризационным состоянием пучка [8]. Такими приложениями являются лидары [9], телекоммуникационные системы [10–13], лазерная обработка материалов [14–16] и микроструктурирование [17, 18], задачи сверхразрешения [19–23] и возбуждения плазмонных волноводов [24]. В работе [25] приведены результаты исследования возможности организации многоканальной системы связи терагерцового диапазона на основе управления поперечно-модовым составом когерентного пучка терагерцового излучения. Разработка методов одновременного управления поперечно-модовым составом и поляризационным состоянием пучка терагерцового излучения в перспективе позволит создавать многоканальные

телекоммуникационные системы терагерцового диапазона с большой информационной емкостью. Подход к формированию пучков терагерцового излучения с заданным поперечно-модовым составом и заданным поляризационным состоянием, описанный в [26] и основанный на использовании интерферометра Маха-Цандера, является достаточно сложным в реализации. Известны работы по управлению поляризационным состоянием когерентного пучка оптического диапазона с помощью субволновых дифракционных оптических элементов [27–29]. В работе [30] авторами был рассчитан, изготовлен и исследован дифракционный оптический элемент для преобразования линейно-поляризованного излучения терагерцового диапазона в цилиндрически-поляризованный пучок - субволновый аксикон.

2. Расчёт, моделирование и изготовление субволнового аксикона

Результаты исследований дифракционных аксиконов оптического диапазона приведены в работах [31-36]. Ранее [29] было показано, что субволновой аксикон может быть использован для преобразования линейно-поляризованного пучка в радиально-поляризованный пучок второго порядка. В [29, 35, 36] было показано, что пучки с таким типом поляризации при острой фокусировке обеспечивают эффективное формирование обратного потока энергии в фокальной области. В работе [30] авторами проведено численное моделирование прохождения гауссова пучка через субволновой кремниевый аксикон с расчетными параметрами изготовленного в [30] аксикона на основе решения уравнений Максвелла методом конечных элементов, реализованных в программном пакете Comsol Multiphysics.

В настоящей работе с целью исследования зависимости качества формируемого пучка от высоты микрорельефа были поставлены дополнительные численные эксперименты. Результаты расчёта представлены в табл. 1. Предполагалось, что гауссов пучок с длиной волны 129 мкм освещает аксикон с периодом 60 мкм, при этом высота микрорельефа варьировалась в пределах от 40 до 60 мкм. Радиус расчётной области в численном эксперименте выбирался равным 580 мкм. Выбранный размер расчётной области был достаточен для анализа поперечной структуры формируемого пучка. Показатель преломления материала подложки аксикона (кремний) для данной длины волны $n = 3,452 + 0,386i$. Таким образом, численное моделирование предсказывает возможность эффективного формирования радиально-поляризованного пучка в терагерцовом диапазоне. Причем оптимальная высота рельефа равна 50 мкм (табл. 1), что соответствует расчетному значению высоты микрорельефа изготовленного элемента [30].

В работе [30] в качестве исходного материала для изготовления субволнового аксикона использовались подложки из высокоомного кремния диаметром 50 мм и толщиной 1 мм с двухсторонней полировкой оптического качества.

Контроль параметров дифракционного микрорельефа изготовленных элементов в [30] осуществлялся методами интерферометрии белого света (рис. 1) и средствами микроскопии. Анализ результатов микроинтерферометрии (рис. 1), демонстрирует высокую точность реализации заданной высоты микрорельефа в [30].

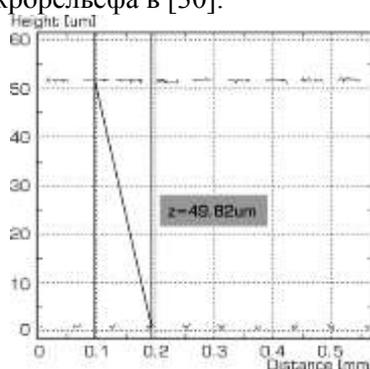


Рисунок 1. Профилограмма микрорельефа в центральной области ДОЭ (интерферометр белого света WLI-DMR) [30].

Таблица 1. Результаты численного исследования зависимости качества формируемого пучка от высоты рельефа субволнового аксикона при прохождении гауссова пучка с горизонтальной линейной поляризацией через субволновой аксикон: распределение амплитуды, горизонтальной и вертикальной составляющих сформированного радиально-поляризованного пучка.

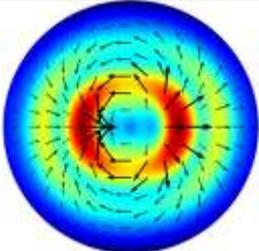
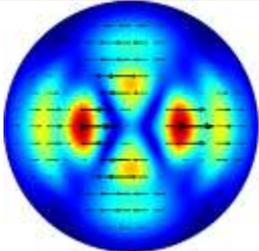
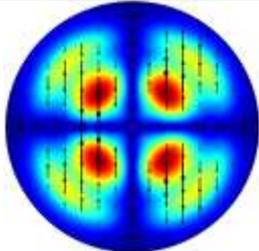
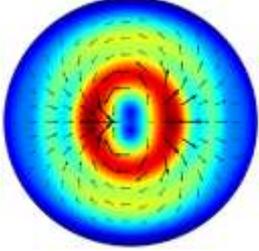
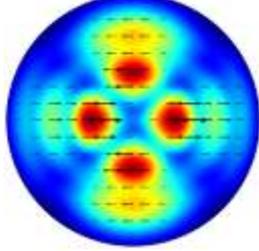
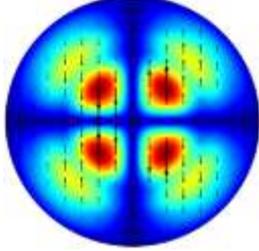
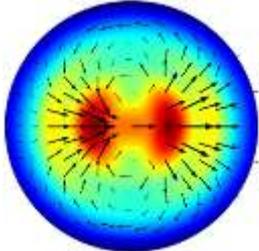
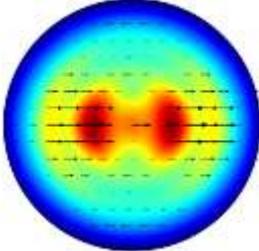
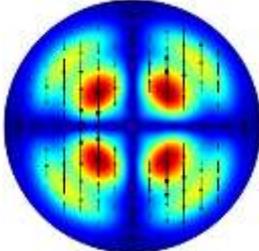
Высота рельефа	Амплитуда	Горизонтальная составляющая	Вертикальная составляющая
40 мкм			
50 мкм			
60 мкм			



Рисунок 2. Фото изготовленного аксикона.

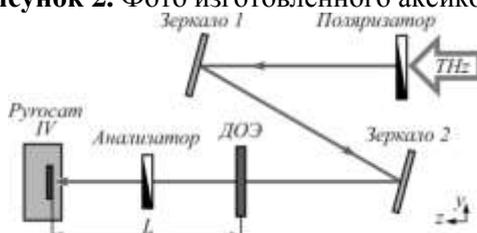


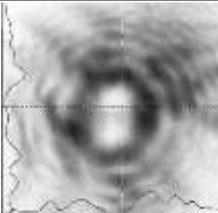
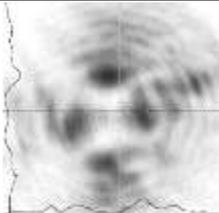
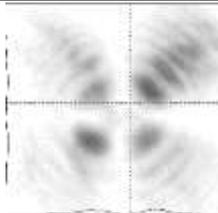
Рисунок 3. Схема эксперимента.

3. Исследование субволнового аксикона

Изготовленный в [30] субволновой аксикон (Рис. 2) был исследован на рабочей станции Новосибирского лазера на свободных электронах (НОВОФЭЛ) в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО

РАН. ДОЭ освещался линейно-поляризованным пучком с гауссовым распределением интенсивности в сечении (модовый радиус $\sigma = 11$ мм, длина волны $\lambda = 128,7$ мкм). Во время экспериментов поляризация исходного пучка устанавливалась с помощью проволочного поляризатора. Пучок проходил через аксикон; изображение прошедшего пучка регистрировалось матричным пироэлектрическим приёмником Ругосат IV с матрицей 320×320 пикселей (размер одного элемента – 80 мкм). Полный размер изображения составлял $25,6 \times 25,6$ мм². Для каждого расстояния снимались три кадра: (1) в отсутствие анализатора, (2) с анализатором, пропускающим электромагнитное поле сонаправлено исходной поляризации, и (3) с анализатором, пропускающим электромагнитное поле с ортогональным исходной поляризации направлением. Характерные результаты оптических экспериментов, поставленных в [30], приведены в табл. 2. Результаты, представленные в табл. 2, находятся в качественном соответствии с результатами численного моделирования, приведенными в табл.1 и в [30]. Имеющиеся расхождения между результатами численного моделирования и натурального эксперимента объясняются наличием технологических погрешностей изготовления микрорельефа (неровностями краев зон ДОЭ [30]).

Таблица 2. Результаты оптического эксперимента.

№	1	2	3
Анализатор	нет	сонаправленное положение	ортогональное положение
L, мм	122	122	122
Изображение			

4. Заключение

Приведены результаты исследования кремниевого субволнового аксикона, изготовленного в [30]. В [30] была экспериментально показана способность изготовленного элемента эффективно формировать цилиндрически-поляризованный пучок из освещающего гауссова пучка терагерцового лазера. Результаты экспериментального исследования [30] находятся в хорошем соответствии с результатами численного моделирования, приведенными в [30] и Табл.1 настоящей работы. Имеющиеся расхождения между результатами численного моделирования (приведенными в [30] и Табл.1 настоящей работы) и натурального эксперимента [30] объясняются наличием технологических погрешностей изготовления дифракционного микрорельефа [30].

Кроме того, численно исследовалась зависимость качества формируемого пучка от высоты изготовленного дифракционного микрорельефа. Найдена оптимальная высота, которая равна 50 мкм.

Ранее, в работе [13] было показано, что суперпозиции цилиндрических векторных пучков с поляризационной сингулярностью могут эффективно применяться для кодирования цифровой информации в оптическом канале. Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность увеличения информационной емкости систем связи терагерцового диапазона не только за счет управления поперечно-модовым составом пучка, что было экспериментально продемонстрировано в [25], но и за счет одновременного управления поперечно-модовым составом пучка и его поляризационным состоянием.

5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 19-72-20202) и частичной поддержке РФФИ (грант № 18-29-20045 мк).

6. Литература

- [1] 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. Skrinsky, S.L. Veber, N.A. Vinokurov // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2015. – Vol. 5(5). – P. 798-809.
- [2] 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(6). – P. 2780.
- [3] 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(8). – P. 1748-1751.
- [4] 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. Сойфер, К.Н. Тукмаков, Е.В. Цыганкова, Ю.Ю. Чопорова // *Автометрия*. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 98-105.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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. – P. 023846.
- [8] 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(1). – P. 013001.
- [9] 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.
- [10] 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(2). – P. 197-200.
- [11] 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(21). – P. 4887-4890.
- [12] 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(1). – P. 2216.
- [13] 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(13). – P. 18484-18492.

- [14] 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(21). – P. 22305.
- [15] 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(2). – P. 226-228.
- [16] Алфёров, С.В. О возможности управления лазерной абляцией 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.
- [17] 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(17). – P. 17967-17973.
- [18] 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*. – 2018. – Т. 107, № 1-2. – С. 18-22.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Hao, 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. – P. 115707.
- [22] 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.
- [23] 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(10). – P. 2242-2246.
- [24] 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.
- [25] Choporova, Y.Y. Two-channel terahertz communication based on spatial mode multiplexing / Y.Y. Choporova, B.A. Knyazev, N.D. Osintseva, V.S. Pavelyev, K.N. Tукмаков // *Proceedings of 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2019. – P. 08874090.
- [26] Павельев, В.С. Управление поперечно-модовой и поляризационной структурой терагерцовых когерентных пучков / В.С. Павельев, Ю.Ю. Чопорова, Н.Д. Осинцева, К.Н. Тукмаков, Б.А. Князев // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 1103-1108. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1103-1108.
- [27] 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.
- [28] 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(8). – P. 1963-1969.
- [29] 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(11). – P. 15129-15135.
- [30] 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.
- [31] 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, № 24. – С. 215-223.
- [32] 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(4). – P. 623-630.
- [33] 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.
- [34] 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(16). – P. 19052-19064.
- [35] Khonina, S.N. Inverse energy flux of focused radially polarized optical beams / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.A. Degtyarev // Physical Review A. – 2018. – Vol. 98(4). – P. 043823.
- [36] 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(8). – P. 2008-2011.

Silicon subwavelength axicons for terahertz beam polarization transformation

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

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

³Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS, Lavrentieva street 11, Novosibirsk, Russia, 630090

⁴Novosibirsk State University, Pirogova street 2, Novosibirsk, Russia

Abstract. Diffractive optical element (DOE) for transforming of linearly polarized THz radiation beam into cylindrically polarized beam is investigated. Optimal diffractive microrelief height is determined by numerical simulation. Perspectives of using such elements in THz telecommunication systems are considered.