

Дифракционная оптика ТГц диапазона: методы, приложения, перспективы

В.С. Павельев^{1,2}

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

Аннотация. Актуальность работы обусловлена появлением новых источников когерентного излучения терагерцового диапазона. Рассмотрены результаты и перспективы применения методов дифракционной оптики для управления излучением терагерцового диапазона.

1. Введение

Появление новых источников излучения терагерцового (ТГц) диапазона, в том числе мощных, таких как лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) [1] и гиротроны [2], требует развития и совершенствования соответствующей элементной базы для управления характеристиками такого излучения. В этом смысле методы дифракционной оптики, хорошо исследованные ранее в задачах управления излучением оптического диапазона [3,4], представляются весьма перспективными. В работах [3,4] на основе анализа результатов расчетов и экспериментов, поставленных в оптическом диапазоне длин волн, показано, что использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) позволяет формировать пучки с заданным поперечно-модовым составом, фокусировать излучение когерентного источника в заданную область и управлять поляризационным состоянием пучка.

2. Методы и технологии дифракционной оптики терагерцового диапазона

Значительное количество работ [5-9] посвящено созданию и исследованию дифракционных 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 (системы сканирования и лазерная обработка поверхностей). Перспективы применения ТГц излучения в системах связи [10,11] и лидарных системах [12] объясняют интерес к возможности формирования пучков с поперечно-модовой структурой и поляризационным состоянием, обеспечивающими наибольшую устойчивость к распространению в дисперсионных средах. В работе [13] приведены результаты применения волноводных устройств для управления поперечно-модовым составом пучков гиротронного излучения гигагерцового диапазона. Недостатками таких устройств являются габаритные характеристики, а также относительная сложность технологического исполнения. Интересно отметить “пограничное” положение диапазона терагерцового длин волн – работая в нем, можно с успехом применять как методы радиофизики, так и оптики.

Появление лазеров на свободных электронах открыло возможность получения когерентных пучков на заданной длине волны [1]. Таким образом, обладая возможностью создания элементов для формирования пучков с заданной поперечной структурой и используя возможности лазера на свободных электронах, можно получать эталонные пучки когерентного излучения заданного модового состава с заданной длиной волны. В случае создания элементов для управления мощными пучками большое значение имеет выбор материала подложки. Анализ свойств оптических материалов терагерцового диапазона приведен в работе [14]. В частности, в работе [14] исследованы свойства таких материалов, как высокоомный кремний, поликристаллические алмазные пленки и полимерные материалы. В работе [9] экспериментально показано, что применение полимерных элементов для этих целей ограничено в силу их невысокой лучевой стойкости. В [7,8] приведены результаты исследования силовых бинарных линз и делителей пучка терагерцового диапазона, изготовленных с помощью технологии однократного плазмохимического травления подложки из высокоомного кремния с применением Бош-процесса в газах SF_6/C_4F_8 . После формирования дифракционного микрорельефа на одной из сторон подложки на обе поверхности элемента наносилось париленовое антиотражающее покрытие [7]. Исследование изготовленных элементов [7] показало их высокую лучевую стойкость (свыше 4 кВт/см^2), однако они обладали невысокой энергетической эффективностью в силу бинарного (двухуровневого) дифракционного микрорельефа (теоретическая оценка для энергетической эффективности бинарной дифракционной линзы, например, составляет 41% [4]). В [15] приведены результаты исследования бинарного кремниевого элемента, предназначенного для фокусировки Гауссова пучка терагерцового лазера в квадрат и изготовленного с помощью технологии, описанной в [7,8]. В работе [16] 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. Технология изготовления кремниевых элементов, использованная в [16], не отличалась от технологии, использованной в [7] для изготовления кремниевых фокусирующих элементов.

В работах [17-21] приведены результаты исследования элементов, предназначенных для формирования мощных пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ) (или “вращающихся пучков” [3]) когерентного излучения терагерцового диапазона. Применение этих элементов в Институте ядерной физики им Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) (ИЯФ СО РАН) впервые позволило сформировать мощные вращающиеся пучки терагерцового диапазона. Появление инструментария для управления поперечной структурой терагерцовых лазерных пучков (в т.ч. мощных) дало возможность ученым ИЯФ СО РАН получить новые экспериментальные результаты в области исследования распространения бездифракционных пучков терагерцового диапазона в однородных [19] и неоднородных средах [21], в области исследования возможности построения многоканальных систем передачи информации терагерцового диапазона с поперечно-модовым управлением в свободном пространстве [11], а также в области формирования поверхностных плазмон-поляритонов терагерцового диапазона [17]. Эксперименты, результаты которых приведены в работах [7-8, 15-21], были поставлены на длинах волн 130-141 мкм.

Однако в работах [16-21] речь идёт лишь 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 [22-31]. К таким приложениям относятся лидары (формирование пучков, устойчивых к распространению в дисперсионных и турбулентных средах [23]), системы связи с поперечно-модовым уплотнением [24-27], лазерная обработка материалов [28] и микроструктурирование [29,30] и задачи возбуждения плазмонных волноводов [31]. В работе [32] рассмотрено изготовление и исследование ДОЭ (субволнового аксикона), позволяющего формировать из гауссова пучка терагерцового лазера пучок с распределением интенсивности, близким к распределению интенсивности в сечении бесселева пучка, с радиальной поляризацией. Однако технология литографии [7] обладает своими недостатками: бинарные (двухуровневые) элементы имеют ограниченную энергетическую

эффективность, в то время как формирование многоуровневого микрорельефа требует многократного повторения операций травления и совмещения фотошаблонов, что является технологически сложной и дорогостоящей процедурой. В работе [34] приведено описание изготовления трехуровневой антиотражающей структуры терагерцового диапазона с помощью технологии литографического травления. Для изготовления терагерцовых кремниевых дифракционных оптических элементов с профилем рельефа, близким к непрерывному (или кусочно-непрерывному), в [35] была разработана технология прямой записи, основанная на лазерной абляции кремниевой поверхности (был использован пикосекундный ИК-лазер). Было экспериментально показано, что применение этой технологии позволяет изготавливать фокусирующие дифракционные оптические элементы со значением дифракционной эффективности, превышающим 92%. В [36] похожий подход был использован для изготовления кремниевого фокусатора гауссова пучка терагерцового лазера в квадрат.

Интересно отметить, что возможность проведения исследований в длинноволновом диапазоне можно рассматривать как возможность постановки модельного эксперимента по взаимодействию коротковолнового излучения с субволновыми структурами в тех случаях, когда постановка такого эксперимента в коротковолновом диапазоне невозможна или слишком затратна.

В работе [20] исследована дифракция терагерцового лазерного пучка с орбитальным угловым моментом (вращающегося пучка) на массиве отверстий. Было впервые продемонстрировано, что при дифракции такого пучка на периодической решетке круглых отверстий в плоскостях, соответствующих плоскостям Тальбота (плоскости самоизображения решетки для обычных пучков), возникают периодические "решетки" кольцевых микропучков с той же закрученностью, что у исходного пучка.

Кроме элементов пропускающей дифракционной оптики исследовались отражающие дифракционные оптические элементы [8] и отражающие оптические элементы свободной формы [37]. Было экспериментально показано [37], что применение обычной технологии фрезерования позволяет изготавливать отражающие сферические и цилиндрические линзы фокусирующие излучение терагерцового лазера на свободных электронах с энергетической эффективностью более 94%. В качестве материала подложки в [37] использовался алюминий. После реализации отражающей поверхности она покрывалась слоем меди методом вакуумного напыления [37]. Отметим, что изготовление оптической поверхности с помощью обычной технологии фрезерования с шероховатостью 15-20 мкм в [37] было целесообразным в силу большой длины волны освещающего пучка (длина волны составляла 129,5 мкм). Приведенные в [37] результаты дают основание утверждать о перспективности подхода к фокусировке излучения терагерцового диапазона, заключающегося в изготовлении отражающих элементов с поверхностями свободной формы ("free-form") с помощью технологии фрезерования металлических подложек.

Известны работы по созданию полимерных дифракционных оптических элементов терагерцового диапазона с помощью 3D печати [6,38-40], однако, разрешения 3D-принтера, как правило, оказывается недостаточно для того, чтобы реализовать дифракционный рельеф терагерцового диапазона с достаточно большим числом уровней квантования ("ступенек"), чтобы изготовленные дифракционные оптические элементы обладали высокой энергетической эффективностью (как минимум, для ближневолновой части терагерцового диапазона). К тому же, полимерные элементы, изготовленные с помощью 3D печати, непригодны для управления мощными пучками лазерного излучения, что делает их непригодными, например, к работе с излучением лазера на свободных электронах [9]. В этом смысле изготовление высокоэффективных дифракционных оптических элементов с помощью технологии абляции кремниевой поверхности, предложенной в [35,36], представляется более перспективным. В то же время разрешения 3D печати вполне достаточно для реализации терагерцовых фотонно-кристаллических структур (в том числе трехмерных), что и было продемонстрировано в ряде работ (например [39,40]). Технология 3D печати позволяет формировать двух- и трехмерные фотонно-кристаллические структуры, которые было бы крайне затруднительно реализовать, например, известной технологией литографии.

Вместе с тем остается нерешенной часть проблем, связанных с реализацией ТГц фотонно-кристаллических элементов с помощью 3D печати:

-создание фотонно-кристаллических структур на пропускание требует высокого значения показателя преломления материала – с этим связаны усилия исследователей по созданию полимерных композитов с включением оптически плотных частиц. В качестве альтернативного решения может быть рассмотрено создание металлodieлектрических ТГц фотонно-кристаллических структур;

-до сих пор не в полной мере использованы возможности эффективного управления спектром терагерцового излучения, которые появляются при использовании неперiodических фотонно-квазикристаллических структур [41-43].

3. Заключение

Таким образом, появление новых источников когерентного излучения ТГц диапазона привело к развитию методов и технологий создания элементов дифракционной оптики и оптических элементов свободной формы, позволяющих формировать пучки с заданным амплитудно-фазовым распределением (поперечно-модовым составом) и поляризационным состоянием.

Кроме того, возможность проведения исследований в длинноволновом диапазоне можно рассматривать как возможность постановки модельного эксперимента по взаимодействию коротковолнового излучения с субволновыми структурами в тех случаях, когда постановка такого эксперимента в коротковолновом диапазоне невозможна или слишком затратна.

4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-29-03303. Автор выражает благодарность Б.А. Князеву, К.Н. Тукмакову, А.Н. Агафонову за полезные обсуждения.

5. 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. Skrinky, S.L. Veber, N.A. Vinokurov // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2015. – Vol. 5(5). – P. 798-809. DOI: 10.1109/THZ.2015.2453121.
- [2] Glyavin, M.Yu. Development and applications of THz gyrotrons // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 149. – P. 01008.
- [3] Gavrilov, A.V. Diffractive Nanophotonics / A.V. Gavrilov, D.L. Golovashkin, L.L. Doskolovich, P.N. Dyachenko, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.G. Nalimov, D.V. Nesterenko, V.S. Pavelyev, Y.O. Shuyupova, R.V. Skidanov, V.A. Soifer – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CISP, 2014.
- [4] Головашкин, Д.Л. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина – М.: Физматлит, 2007.
- [5] 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.
- [6] 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. DOI: 10.1364/OL.41.001748.
- [7] 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.
- [8] Агафонов, А.Н. Дифракционные линзы для мощных пучков терагерцового излучения / А.Н. Агафонов, М.Г. Власенко, Б.О. Володкин, В.В. Герасимов, А.К. Кавеев, Б.А. Князев,

- Г.И. Кропотов, В.С. Павельев, И.Г. Пальчикова, В.А. Сойфер, М.Ф. Ступак, К.Н. Тукмаков, Е.В. Цыганов, Ю.Ю. Чопорова / Известия РАН. Серия физическая. – 2013. – Т. 77, № 9. – С. 1330-1332.
- [9] Knyazev, V.A. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: Comparative description of imaging techniques with examples of application / V.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(10). – P. 1207-1222.
- [10] Bubnov, G.M. Data rates of SubTHz wireless telecommunication channels / G.M. Bubnov, I.V. Lesnov, V.F. Vdovin // *EPJ Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 149. – P. 02012.
- [11] Choporova, Y.Y. Two-channel terahertz communication based on spatial mode multiplexing / Y.Y. Choporova, V.A. Knyazev, N.D. Osintseva, V.S. Pavelyev, K.N. Tukmakov // *Proceedings of 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2019. – P. 08874090.
- [12] Кулипанов, Г.Н. Экспериментальные исследования взаимодействия терагерцового излучения новосибирского лазера на свободных электронах с водным аэрозолем / Г.Н. Кулипанов, А.А. Лисенко, Г.Г. Матвиенко, В.К. Ошлаков, В.В. Кубарев, Е.Н. Чесноков, С.В. Бабченко // *Оптика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 27, № 12. – С. 1070-1073.
- [13] Sobolev, D.I. Polarization-dependent TE₁₁-to-TE₁₁/TE₀₁ waveguide mode converter for transmission line mode switching / D.I. Sobolev, G.G. Denisov, A.G. Ereemeev, V.V. Holoptsev, A.I. Tsvetkov // *EPJ Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 149. – P. 04017.
- [14] Рогалин, В.Е. Оптические материалы для ТГц диапазона / В.Е. Рогалин, И.А. Каплунов, Г.И. Кропотов // *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – Т. 125, № 8. – С. 851-863.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Knyazev, V.A. Generation of terahertz surface plasmon polaritons using nondiffractive Bessel beams with orbital angular momentum / V.A. Knyazev, Y.Y. Choporova, M.S. Mitkov, V.S. Pavelyev, B.O. Volodkin // *Physical Review Letters*. – 2015. – Vol. 115. – P. 163901.
- [18] Volodkin, B. Fabrication and characterization of diffractive phase plates for forming high-power terahertz vortex beams using free electron laser radiation / B. Volodkin, Y. Choporova, V. Knyazev, G. Kulipanov, V. Pavelyev, V. Soifer, N. Vinokurov // *Optical and Quantum Electronics*. – 2016. – Vol. 48(4). – P. 48-56.
- [19] Choporova, Yu.Yu. High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range / Yu.Yu. Choporova, V.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(2). – P. 023846.
- [20] Knyazev, V. Quasi-Talbot effect with vortex beams and formation of vortex beamlet arrays / V. Knyazev, O. Kameshkov, N. Vinokurov, V. Cherkassky, Y. Choporova, V. Pavelyev // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26(11). – P. 4174-4185.
- [21] Knyazev, V.A. Transmission of high-power terahertz beams with orbital angular momentum through atmosphere / V.A. Knyazev, Y.Yu. Choporova, V.S. Pavelyev, N.D. Osintseva, B.O. Volodkin // *41th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Copenhagen, 2016. – P. T5.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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. DOI: 10.1364/OE.27.018484.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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. 1103-1109. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1103-1108.
- [34] Pavelyev, V.S. Broadband Silicon Absorber of Terahertz Radiation / V.S. Pavelyev, K.N. Tukmakov, A.S. Reshetnikov, I.A. Tsibizov, G.I. Kropotov // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2019. – Vol. 13(6). – P. 1302-1305.
- [35] Kononenko, T.V. Silicon kinoform cylindrical lens with low surface roughness for high-power terahertz radiation / T.V. Kononenko, B.A. Knyazev, D.N. Sovyk, V.S. Pavelyev, M.S. Komlenok, G.A. Komandin, V.I. Konov // *Optics and Laser Technology*. – 2020. – Vol. 123. – P. 105953.
- [36] Тукмаков, К.Н. Изготовление методом лазерной абляции и исследование кремниевого фокусатора излучения терагерцового диапазона с непрерывным дифракционным микрорельефом / К.Н. Тукмаков, М.С. Комленок, В.С. Павельев, Т.В. Кононенко, В.И.

- Конов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 941-946. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-941-946.
- [37] Agafonov, A.N. Elements of the Terahertz Power Reflective Optics with Free-Form Surfaces / A.N. Agafonov, B.A. Knyazev, V.S. Pavel'ev, E.I. Akhmetova, V.I. Platonov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2019. – Vol. 55(2). – P. 148-153.
- [38] Wei, X. Generation of arbitrary order Bessel beams via 3D printed axicons at the terahertz frequency range / X. Wei, C. Liu, L. Niu, Z. Zhang, K. Wang, Z. Yang, J. Liu // Appl Opt. – 2015. – Vol. 54(36).
- [39] Tubío, C.R. 3D printing of Al₂O₃ photonic crystals for terahertz frequencies / C.R. Tubío, J.A. Nóvoa, J. Martín, F. Guitián, J.R. Salgueiro, A. Gil // RSC Advances. – 2016. – Vol. 6(3). – P. 2450-2454.
- [40] Yang, J. 3D printed low-loss THz waveguide based on Kagome photonic crystal structure / J. Yang, J. Zhao, C. Gong, H. Tian, L. Sun, P. Chen, L. Lin, W. Liu // Opt. Express. – 2016. – Vol. 24(20). – P. 22454-22460.
- [41] Dyachenko, P.N. Graded photonic quasicrystals / P.N. Dyachenko, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer // Optics Letters. – 2012. – Vol. 37(12). – P. 2178-2180.
- [42] Дьяченко, П. Н. Зонная структура трехмерных фотонных аппроксимантов квазикристалла / П. Н. Дьяченко, Ю.В. Микляев, В.Е. Дмитриенко, В.С. Павельев // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32(3). – С. 216-221.
- [43] Dyachenko, P.N. Complete photonic band gap in icosahedral quasicrystals with a body-centered six-dimensional lattice / P.N. Dyachenko, V.E. Dmitrienko, Y.V. Miklyaev, V.S. Pavelyev // Proceedings of SPIE. – 2008. – Vol. 6989. – P. 69891T.

THz Diffractive Optics: methods, applications, perspectives

V.S. Pavelyev^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. Development of terahertz lasers determines actuality of research in the field of THz diffractive optics. Results and perspectives of THz diffractive optics application are considered.