21

Пространственная модуляция терагерцового излучения при помощи генераторов оптических вихрей на основе тонких пленок одностенных углеродных нанотрубок

© А.В. Радивон[1], М.И. Пауков[1], Г.М. Катыба[2], Н.И. Рагинов[3], А.В. Черных[4], А.С. Езерский[4], Е.Г. Цыплакова , И.И. Раков[1], А.В. Арсенин[1], И.Е. Спектор[5], К.И. Зайцев[5], Д.В. Красников[3], Н.В. Петров[4,6], А.Г. Насибулин[3], В. Волков[1], М.Г. Бурданова[1,2]

[1] Центр фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
[2] Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка, Россия
[3] Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия
[4] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
[5] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия
[6] Центр инноваций и развития Харбинского инженерного университета, Циндао, Китай

e-mail: burdanova.mg@mipt.ru

Поступила в редакцию 05.02.2025 г.
В окончательной редакции 20.02.2025 г.
Принята к публикации 28.02.2025 г.

Представлены результаты исследования работы модулятора орбитального углового момента в субмиллиметровом диапазоне (340 GHz) на основе тонких пленок одностенных углеродных нанотрубок. Для получения характеристик пространственной модуляции гауссова пучка созданы спиральные зонные пластинки с использованием современной методики синтеза и нанесения наноструктур различной толщины на подложку. Использование комбинации спиральных зонных пластин позволяет перераспределять энергию в терагерцовом пучке по различным генерируемым оптическим вихрям. Изготовленные дифракционные элементы обладают перестраиваемыми характеристиками, такими как перераспределяющийся орбитально угловой момент и число зарядов. Полученные генераторы орбитального углового момента могут быть интегрированы в системы связи нового поколения.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, пространственная модуляция терагерцового излучения, перестраиваемый оптический элемент, спиральная зонная пластинка, оптический вихрь.

DOI: 10.61011/OS.2025.03.60248.15-25

Введение

В связи с активными разработками источников и детекторов терагерцового (ТГц) излучения расширилась сфера их применения — в биомедицинских приложениях [1], микроскопии [2], спектроскопии, безопасность и высокоскоростной передаче информации [3]. Тем не менее развитие этих технологий затормаживается несовершенством современной базы оптических элементов, необходимых для обработки сигналов [4]. Решение данной проблемы требует поиска подходящих материалов, геометрии устройств с возможностью точного контроля рабочих параметров.

В частности, для различных применений (например, для определения магнитных свойств, контроля квантового конденсата Бозе-Эйнштейна, беспроводной связи, генерации плазмон-поляритонов, ТГц визуализации) появляется необходимость в генераторах оптических вихрей ТГц диапазона [5]. Их польза в данных применениях связана с тем, что вихри характеризуются орбитальным угловым моментом, а также возможность разложения пучка по вихревым модам может увеличивать информационную емкость оптических каналов при передаче информации [6]. Созданию модуляторов орбитального углового момента однако до сих пор уделяется мало внимания. Среди имеющихся для этого подходов можно выделить варифокальные вращательные системы металинз, однако такой метод требует сложной процедуры создания метаповерхностей, а также это решение слабо позволяет создавать перестраиваемые оптические элементы [7].

Для создания адаптивных оптических элементов, работающих в ТГц диапазоне, требуются материалы, обладающие высокой и перестраиваемой проводимостью

в ТГц диапазоне, а также механической и химической стабильностью [8,9]. Одними из таких материалов являются тонкие пленки одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ). Помимо указанных свойств, пленки ОУНТ могут быть масштабируемо воспроизводимы и нанесены на любую подложку методом сухого переноса [10,11]. В совокупности данные преимущества позволяют активно использовать ОУНТ для создания элементов ТГц оптики — источников [12], детекторов [13], линз [14], модуляторов [8], перестраиваемых дифракционных решеток [15] и др. Тем не менее использование пленок ОУНТ в качестве генераторов оптических вихрей ТГц диапазона до сих пор не реализовано, хотя структуры на их основе обладают возможностью перестройки за счет различных параметров — растяжения [16], электрохимического допирования [9], мощности импульсной оптической накачки [17], наличия газовой среды [18].

В настоящей работе впервые представлен генератор оптических вихрей в ТГц диапазоне на основе тонких пленок ОУНТ, представляющий спиральную зонную пластинку (СЗП). Рассматриваемые здесь спирали являются тонкими — ширина линии в центре сравнима с шириной линии на расстоянии радиуса от центра. По сравнению с ранее представленными вихревыми модуляторами описываемое устройство демонстрирует простой подход к улучшению модуляции вихревого пучка (управлению орбитального углового момента). Кроме того, его производство было усовершенствовано с использованием ультратонких компактных устройств на основе ОУНТ. СЗП создана благодаря передовым технологиям производства пленок нанотрубок и надежному методу их нанесения с требуемой геометрией на подложку. В работе показана многофункциональность СЗП, а также ее поведение в зависимости от толщины пленок ОУНТ.

Методы

Создание паттернов на основе одностенных углеродных нанотрубок

ОУНТ, использованные для создания спиральных зонных пластинок, были синтезированы методом аэрозольного химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) [19]. В качестве подложки для нанесения паттерна ОУНТ был использован эластомер (Silpuran, Wacker) толщиной $t = 0,1$ mm, прозрачный в терагерцовом диапазоне. Первичная стадия нанесения паттерна на подложку представляет создание металлической маски методом импульсной лазерной абляции с получением прорезей в виде спиралей толщиной $150-200\,\mu$m (рис. 1). Для процесса лазерной абляции был использован волоконный лазер IPG, работающий в области частот 1060–1070 nm (длительность импульса $\tau = 100$ ns, частота следования импульсов $\nu = 20$ kHz, энергия в импульсе $E = 1$ mJ). Движение лазерного пучка по поверхности маски осуществлялось гальвано-оптической системой зеркал с использованием фокусирующего F-Theta объектива с фокусным расстоянием $F = 207$ mm для обеспечения равномерного облучения поверхности. Далее паттерн наносился на нитроцеллюлозный гидрофильный фильтр (HAWP, Merck Millipore, размер пор $0.45\,\mu$m) путем протягивания фильтра с прикрепленной металлической маской через ролики, чтобы сжать поры в определенных местах и уменьшить их пропускную способность. В то же время области маски с гравировкой не касались нитроцеллюлозного фильтра. Это позволило нанести аэрозоль ОУНТ в виде тонких пленок на области без сжатия пор, повторяя геометрию маски. Полученная структура переносилась методом сухого переноса на подложку (рис. 1) [20]. Изготовленные образцы характеризовались высоким разрешением нанесенного рисунка, его острыми краями и практически полным отсутствием нанотрубок в промежутках между частями паттерна. В предыдущих работах нами было показано, что ОУНТ, синтезированные методом аэрозольного ХОГФ, обладают отличительно высокой удельной проводимостью в ТГц диапазоне ($250\,\Omega^{-1}\mathrm{cm}^{-1}$ на частоте 1 THz). Кроме того, было показано, что проводимость растет при увеличении длины волны вследствие большого числа свободных носителей заряда.

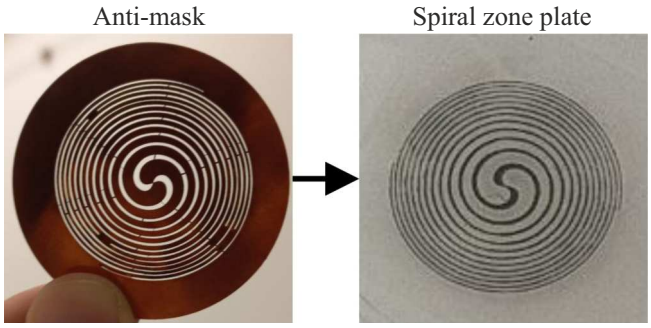

Рис. 1. Процедура изготовления СЗП на основе ОУНТ. На левом рисунке показан медный трафарет, выгравированный с помощью импульсной лазерной абляции. На правом изображена тонкая пленка ОУНТ, нанесенная на нитроцеллюлозный фильтр с отпечатанным рисунком.

Сканирование пучка терагерцового диапазона за плоскостью паттерна

Экспериментальная апробация изготовленных паттернов СЗП была осуществлена на сборной установке по визуализации в ТГц диапазоне (рис. 2, детальное описание установки может быть найдено, например, в [14]). В качестве источника непрерывного ТГц излучения была использована лампа обратной волны (ЛОВ). Частота работы ЛОВ, $\nu = 340$ GHz, относительная спектральная ширина $\delta\nu/\nu \sim 10^{-5}$, выходная мощность $P = 10^{-2}$ mW, чувствительность $S_V = 10^{-5}$ V/W. После прохождения через коллимирующую линзу пучок попадал на сеточный поляризатор, приобретая линейную поляризацию.

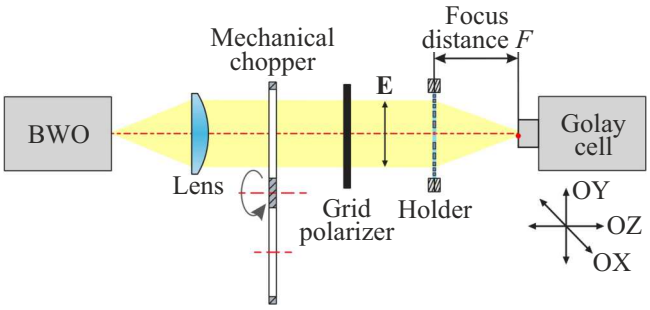

Рис. 2. Схема экспериментальной установки: лампа обратной волны (ЛОВ), коллимирующая линза, механический чоппер, сетчатый поляризатор, держатель, ячейка Голея. ЛОВ использовалась в качестве источника ТГц излучения, а ячейка Голея в качестве детектора.

В качестве детектора излучения использовалась ячейка Голея с временем отклика $\tau = 10^{-1}$ s, при этом для модуляции излучения использовался чоппер с частотой модуляции $\nu_{mod} = 22$ Hz. Для определения интенсивности изучения был изготовлен наконечник из пластика типа ABS с углеродными примесями. Внутри наконечника было сделано отверстие диаметра $b = 600\,\mu$m. С целью уменьшения соотношения сигнал-шум была использована комбинация коллимирующей асферической широкоапертурной линзы из полиэтилена высокой плотности (HDPE) [21] и плосковыпуклой линзы из поли-4-метилпентена (TPX), фокусирующей ТГц излучение на входном окне ячейки Голея. Заднее фокусное расстояние асферической линзы $f' = 6.62$ mm, фокусирующей линзы $f'' = 25.00$ mm, диаметр обеих линз $d = 25.40$ mm. Детектор устанавливался на моторизированную подвижку, обладающую точностью позиционирования $\leq 2\,\mu$m, давая возможность провести двумерное попиксельное сканирование интенсивности ТГц пучка на площади $6 \times 6\,\text{mm}^2$ с шагом сканирования $250\,\mu$m. СЗП фиксировались на металлическом кольце диаметра $D = 50.10$ mm, значительно превышающего диаметр ТГц пучка.

Результаты

Исследование параметров одиночных СЗП

Согласно нашей концепции, ТГц ультратонкие СЗП с различными топологическими зарядами и фокусными расстояниями использовались в качестве отдельных элементов для многофункциональных спиральных модуляторов (МСМ). Экспериментальная характеристика изготовленных вихревых пучков ТГц была выполнена с использованием самодельной системы визуализации непрерывной ТГц волны (рис. 2). Спирали располагались в плоскости $X0Y$ (точка (0,0,0) соответствует центру оптического вихря), при этом регистрировались двумерные сечения интенсивности ТГц поля $I(x, y, z = \text{const})$ в окрестности фокального пятна СЗП, расстояние от оптического элемента z регулировалось с помощью микрометра. Полученные $2D$-распределения интенсивности представлены на рис. 3. В частности, были получены смоделированные и экспериментальные изображения интенсивности для СЗП с топологическими зарядами $m = 2$ и $m = 3$ и теоретическим фокусным расстоянием $F = 10$ mm (рис. 3, *a* и *b* соответственно), а также комбинации двух СЗП с топологическими зарядами $m = 3$ (рис. 3, *c*). Для двухзарядной спирали можно наблюдать два пятна и три для трехзарядной соответственно.

Исследование параметров вращательной комбинации нескольких СЗП

Для демонстрации перестраиваемости МСМ были использованы модуляторы, состоящие из двух одиночных идентичных СЗП, прикрепленных близко друг к другу с возможностью вращения (рис. 3, *c*). Аналогично одиночной СЗП были записаны профили интенсивности $I(x, y, z = \text{const})$ поперек направления распространения ТГц пучка для разных расстояний от двухслойной СЗП. В левой части панели рис. 3, *c* представлены результаты моделирования. Экспериментальные значения фокусного расстояния хорошо совпадают с теоретическими расчетами с точностью до шага сканирования по координате z (0.5 mm). Также следует учитывать, что при объединении спиралей и размещении их в соприкосновении небольшое расстояние между ними в 0.3 mm, представляющее толщину подложки каждого образца, внесло некоторую неоднозначность в определение положения фокуса.

Обсуждение результатов

Результаты эксперимента подтверждают правильность построенной концепции, однако СЗП показали относительно низкую дифракционную эффективность. Данный эффект, скорее всего, связан с несовершенством процедуры изготовления СЗП, возникающим на этапе использования роликового пресса и приводящим к небольшой эллиптичности образца. При повышении точности изготовления описанные проблемы могут быть нивелированы. Также улучшить фокусировку описанных элементов сможет как утолщение самих образцов с целью увеличения поглощения, так и уширение спиралей в центре, снижая влияние нулевого порядка.

В целом модулятор на основе СЗП способен генерировать различные состояния орбитального углового момента в зависимости от топологических зарядов установленных пластин, перераспределять интенсивность между целевыми вихревыми и безвихревыми компонентами этих режимов и регулировать фазовый сдвиг между этими режимами.

Профили вихревых пучков в основном аналогичны несимметричным модам высокого порядка в мультимодальных ТГц волноводах [22,23]. Это обстоятельство

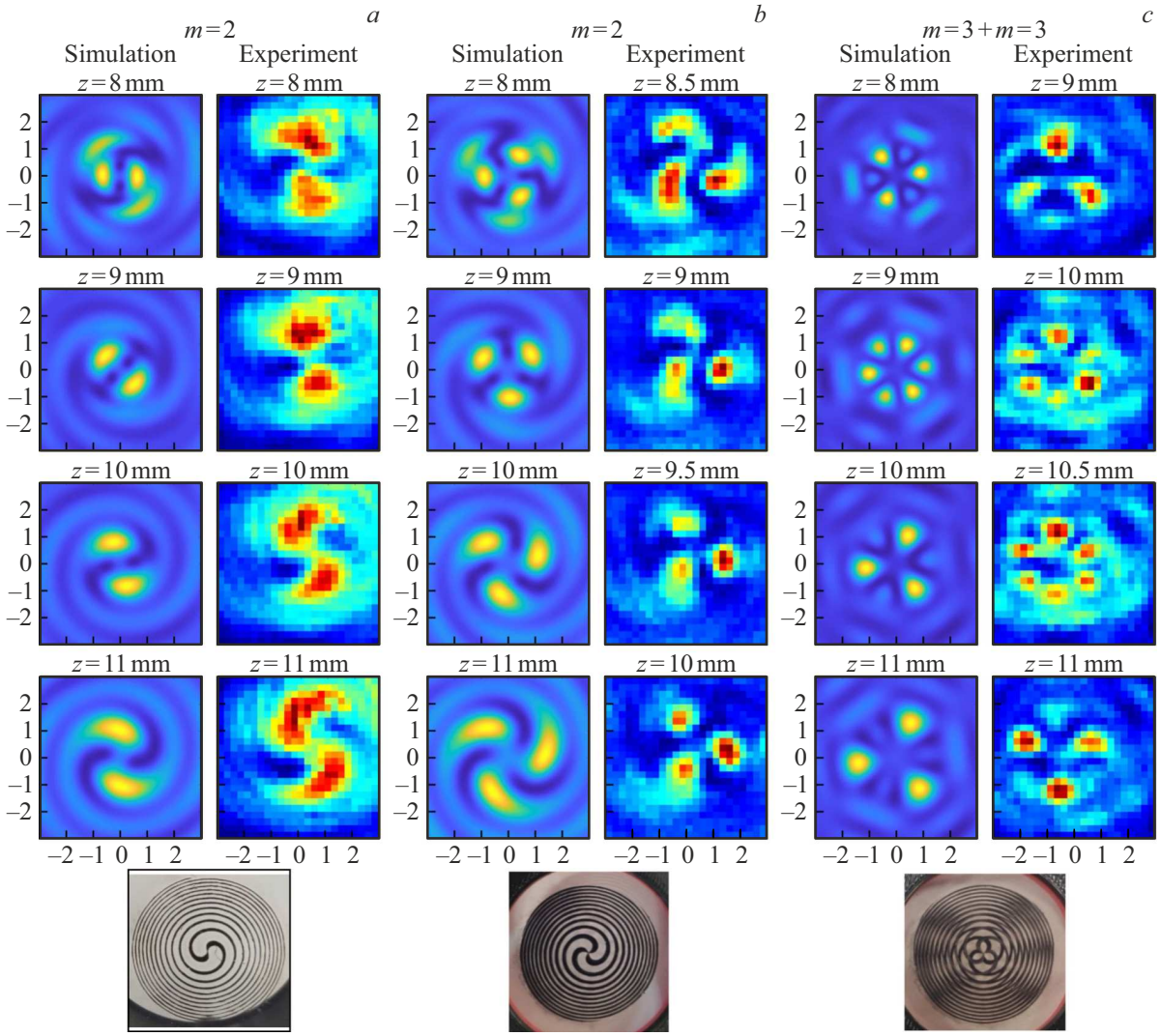

Рис. 3. Преобразование ТГц пучка при прохождении через *a* — двухзарядную СЗП, *b* — трехзарядную СЗП, *c* — комбинацию двух трехзарядных СЗП. Слева в каждой панели изображены результаты моделирования, справа — результаты эксперимента. Снизу расположены фотографии полученных элементов.

позволяет управлять возбуждением мод высокого порядка для настройки многомодовых каналов для задач ТГц проводной телекоммуникации [24]. Предлагаемый подход широко масштабируем при использовании вращения нескольких СЗП для мультиплексирования/демультиплексирования и мультипликации генерации вихрей.

Кроме того, дальнейшее развитие устройства СЗП включает контролируемое управление проводимостью ОУНТ в ТГц диапазоне оптическим, термическим, электрохимическим или механическим воздействием, которое влияет на функциональность СЗП.

Выводы

В результате работы был создан многофункциональный модулятор орбитального углового момента ТГц излучения на основе вращательной комбинации СЗП. Созданный модулятор может предсказуемо перераспределять интенсивность между вихревыми и безвихревыми компонентами этих мод и регулировать фазовый сдвиг между модами на основе топологических зарядов реализованных пластин. Экспериментально измерена эффективность одной СЗП и различных комбинаций многофункциональных СЗП, что подтвердило предложенную концепцию управления орбитальным угловым моментом ТГц пучка. Пространственное вращение обеспечивает степень свободы для реализации различных ТГц модуляций. Получаемые в результате пучки могут найти многообещающее применение в новых системах ТГц визуализации и системах связи нового поколения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] O.A. Smolyanskaya, N.V. Chernomyrdin, A.A. Konovko, K.I. Zaytsev, I.A. Ozheredov, O.P. Cherkasova, M.M. Nazarov, J.-P. Guillet, S.A. Kozlov, Yu.V. Kistenev, J.-L. Coutaz, P. Mounaix, V.L. Vaks, J.-H. Son, H. Cheon, V.P. Wallace, Yu. Feldman, I. Popov, A.N. Yaroslavsky, A.P. Shkurinov, V.V. Tuchin. Progress in Quantum Electronics, **62**, 1 (2018). DOI: 10.1016/j.pquantelec.2018.10.001

[2] R. Kersting, H.-T. Chen, N. Karpowicz, G.C. Cho. Journal of Optics A Pure and Applied Optics, **7** (2), 184 (2005). DOI: 10.1088/1464-4258/7/2/024

[3] A. Shafie, N. Yang, C. Han, J.M. Jornet, M. Juntti, T. Kürner. IEEE Network, **37** (3), 162 (2023). DOI: 10.1109/MNET.118.2200057

[4] M. Laikin. Lens Design. Optical Science and Engineering, 4th edition. (CRC Press, Boca Raton, FL, 2006).

[5] N.V. Petrov, B. Sokolenko, M.S. Kulya, A. Gorodetsky, A.V. Chernykh. Light: Advanced Manufacturing, **3** (1), 640 (2022). DOI: 10.37188/lam. 2022.043

[6] A.E. Willner, K. Pang, H. Song, K. Zou, H. Zhou. Applied Physics Reviews, **8** (4), 041312 (2021). DOI: 10.1063/5.0054885

[7] H. Moser, C. Rockstuhl. Laser and Photonics Reviews, **6**, 219 (2012). DOI: 10.1002/lpor.201000019

[8] M.G. Burdanova, G.M. Katyba, R. Kashtiban, G.A. Komandin, E. Butler-Caddle, M. Staniforth, A.A. Mkrtchyan, D.V. Krasnikov, Yu.G. Gladush, J. Sloan, A.G. Nasibulin, J. Lloyd-Hughes. Carbon, **173**, 245 (2021). DOI: 10.1016/j.carbon.2020.11.008

[9] D.S. Kopylova, D. Satko, E.M. Khabushev, A.V. Bubis, D.V. Krasnikov, T.M. Kallio, A.G. Nasibulin. Carbon, **167**, 244 (2020). DOI: 10.1016/j.carbon.2020.05.103

[10] D.A. Ilatovskii, E.P. Gilshtein, O.E. Glukhova, A.G. Nasibulin. Advanced Science, **9** (24), 2201673 (2022). DOI: 10.1002/advs.202201673

[11] D.V. Krasnikov, B.Y. Zabelich, V.Y. Iakovlev, A.P. Tsapenko, S.A. Romanov, A.A. Alekseeva, A.K. Grebenko, A.G. Nasibulin. Chemical Engineering Journal, **372**, 462 (2019). DOI: 10.1016/j.cej.2019.04.173

[12] R.R. Hartmann, J. Kono, M.E. Portnoi. Nanotechnology, **25**, 322001 (2014). DOI: 10.1088/0957-4484/25/32/32200

[13] M. Jin, Y. Wang, M. Chai, C. Chen, Z. Zhao, T. He. Advanced Functional Materials, **32** (11), 2107499 (2021). DOI: 10.1002/adfm.202107499

[14] G.M. Katyba, N.I. Raginov, E.M. Khabushev, V.A. Zhelnov, A. Gorodetsky, D.A. Ghazaryan, M.S. Mironov, D.V. Krasnikov, Yu.G. Gladush, J. Lloyd-Hughes, A.G. Nasibulin, A.V. Arsenin, V. Volkov, K.I. Zaytsev, M.G. Burdanova. Optica, **10**, 53 (2023). DOI: 10.1364/optica.475385

[15] I.V. Novikov, N.I. Raginov, D.V. Krasnikov, S.S. Zhukov, K.V. Zhivetev, A.V. Terentiev, D.A. Ilatovskii, A. Elakshar, E.M. Khabushev, A.K. Grebenko, S.A. Kuznetsov, S.D. Shandakov, B.P. Gorshunov, A.G. Nasibulin. Chemical Engineering Journal, **485**, 149733 (2024). DOI: 10.1016/j.cej.2024.149733

[16] M.I. Paukov, V.V. Starchenko, D.V. Krasnikov, G.A. Komandin, Yu.G. Gladush, S.S. Zhukov, B.P. Gorshunov, A.G. Nasibulin, A.V. Arsenin, V. Volkov. Ultrafast Science, **3**, 0021 (2023). DOI: 10.34133/ultrafastscience.0021

[17] M.G. Burdanova, A.P. Tsapenko, D.A. Satco, R. Kashtiban, C.D.W. Mosley, M. Monti, M. Staniforth, J. Sloan, Yu.G. Gladush, A.G. Nasibulin, J. Lloyd-Hughes. ACS Photonics, **6** (4), 1058 (2019). DOI: 10.1021/acsphotonics.9b00138

[18] B. Arash, Q. Wang. Scientific Reports, **3**, 1782 (2013). DOI: 10.1038/srep01782

[19] E.M. Khabushev, D.V. Krasnikov, O.T. Zaremba, A.P. Tsapenko, A.E. Goldt. The Journal of Physical Chemistry Letters, **10**, 6962 (2019). DOI: 10.1021/acs. jpclett.9b02777

[20] A. Kaskela, A.G. Nasibulin, M.Y. Timmermans, B. Aitchinson, A. Papadimitratos, Y. Tian, Z. Zhu, H. Jiang, D.P. Brown, A. Zakhidov, E.I. Kauppinen. Nano Letters, **10**, 4349 (2010). DOI: 10.1021/nl101680s

[21] N.V. Chernomyrdin, A.O. Schadko, S.P. Lebedev, V.L. Tolstoguzov, V.N. Kurlov, I.V. Reshetov, I.E. Spektor, M. Skorobogatiy, S.O. Yurchenko, K.I. Zaitsev. Applied Physics Letters, **110**, DOI: 10.1063/1.4984952

[22] G.M. Katyba, K.V. Zaytsev, N.V. Chernomyrdin, I.A. Shikunova, G.A. Komandin, V.B. Anzin, S.P. Lebedev, I.E. Spektor, V.E. Karasik, S.O. Yurchenko, I.V. Reshetov, V.N. Kurlov, M. Skorobogatiy. Advanced Optical Materials, **6**, 1800573 (2018). DOI: 10.1002/adom.201800573

[23] K.I. Zaytsev, G.M. Katyba, N.V. Chernomyrdin, I.N. Dolganova, A.S. Kucheryavenko, A.N. Rossolenko, V.V. Tuchin, V.N. Kurlov, M. Skorobogatiy. Advanced Optical Materials, **8**, 2000307 (2020). DOI: 10.1002/adom.202000307

[24] X. Guofu, M. Skorobogatiy. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, **43**, 728 (2022). DOI: 10.1007/s10762-022-00879-x