

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-78-86>



УДК 535.015

Металинза на основе одиночных диэлектрических микрочастиц для фотопроводящих оптико-терагерцовых преобразователей

И.А. Глинский^{1,®},
Н.В. Зенченко¹,
Д.С. Пономарев²

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва 117105, Россия

®Автор для переписки, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru

В работе теоретически исследовано влияние эффекта фокусировки лазерного импульса накачки ($\lambda_0 = 800$ нм) одиночной диэлектрической микрочастицей, размещенной в зазоре между электродами оптико-терагерцового преобразователя (ОТП). Данный подход предложен в противовес методу повышения эффективности ОТП за счет структурирования краев электродов для формирования плазмонных решеток. Для уменьшения потерь на отражение импульса накачки от поверхности фотопроводника предложено использовать просветляющий слой из оксида алюминия (Al_2O_3). С помощью электромагнитного моделирования методом конечных элементов были получены картины распределения интенсивности E^2 в фотопроводящем слое ОТП при различных диаметрах микрочастицы и толщины просветляющего покрытия Al_2O_3 . В качестве материала фотопроводника использовался полупроводящий арсенид галлия. Изучены свойства формируемой фотонной струи и построены зависимости коэффициента усиления поля (δ_{opt}) и полной ширины на уровне половинной амплитуды (FWHM) от диаметра микрочастицы. Показано, что благодаря оптимизации диаметра микрочастицы ($d_{particle} = 1.2$ мкм) и подбору оптимальной толщины Al_2O_3 ($h_{Al_2O_3} = 200$ нм), возможно добиться максимально эффективного пропускания импульса лазерной накачки в фотопроводник с повышенной амплитудой пространственной локализации излучения ($\delta_{opt} \sim 8.7$ раз) и добиться значения $FWHM \sim 0.34 \cdot \lambda_0$, тем самым преодолев дифракционный предел Аббе.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о значительных преимуществах применения диэлектрических метаповерхностей при проектировании ОТП, а предложенная конструкция металинзы на основе одиночной диэлектрической микрочастицы может стать перспективным методом повышения эффективности конверсии ОТП.

Ключевые слова: терагерцовые технологии, терагерцовая импульсная спектроскопия, источники и детекторы ТГц излучения, суб-волновая фокусировка излучения, терагерцовые оптические элементы и системы, оптико-терагерцовая конверсия, метаповерхность, металинза

Для цитирования: Глинский И.А., Зенченко Н.В., Пономарев Д.С. Металинза на основе одиночных диэлектрических микрочастиц для фотопроводящих оптико-терагерцовых преобразователей. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):78-86. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-78-86>

All-dielectric metalens based on a single colloidal particle for photoconductive optical-to-terahertz switches

Igor A. Glinskiy^{1,@},
Nikolay V. Zenchenko¹,
Dmitry S. Ponomarev²

¹MIREA – Russian Technological University, 119454 Moscow, Russia

²Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow 117105, Russia

@Corresponding author, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru

In this paper, we theoretically study the focusing of laser pump pulse ($\lambda_0 = 800$ nm) by a single dielectric microparticle placed onto the gap between the electrodes of an optical-to-terahertz (THz) switches (OTS). We propose an alternative to the incorporation of plasmonic grating approach that is aimed at the increase of the optical-to-THz conversion efficiency. To reduce the Fresnel losses due to reflection of the pump pulse from the surface of the photoconductor, we additionally use an antireflection coating layer – aluminum oxide (Al_2O_3). By using electromagnetic modeling with finite element method we plot the intensity distribution E^2 profiles within the photoconductive layer of the OTS which were obtained for different diameters of the microparticle and the thickness of the Al_2O_3 antireflection coating layer. We use a semi-insulating gallium arsenide as a photoconductor. The properties of the formed photonic jet are studied, and the dependences of the field enhancement factor (δ_{opt}) and full width at the half-maximum level (FWHM) on the microparticle diameter are plotted. It is shown that the optimization of the microparticle diameter ($d_{particle} = 1.2 \mu\text{m}$) and the selection of the optimal Al_2O_3 thickness ($h\text{Al}_2\text{O}_3 = 200$ nm) makes it is possible to achieve the most efficient transmission of the laser pump pulse into the photoconductor with an increased amplitude of spatial radiation localization ($\delta_{opt} \sim 8.7$ times) and to achieve the FWHM $\sim 0.34 \lambda_0$, thereby overcoming the Abbe diffraction limit. Thus, the obtained results indicate advantages of

such dielectric metasurfaces in the designing of OTS. Moreover, the proposed design of a meta lens based on a single dielectric microparticle can become a promising method for increasing the efficiency of OTS.

Keywords: terahertz technology, pulsed terahertz spectroscopy, emitters and detectors of THz radiation, sub-wavelength radiation, terahertz optical elements and systems, optical to terahertz conversion, metasurface, metalens

For citation: Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Ponomarev D.S. All-dielectric metalens based on a single colloidal particle for photoconductive optical-to-terahertz switches *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):78-86 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-78-86>

Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон представляет значительный научный и практический интерес, поскольку именно в этой области спектра лежат частоты некоторых элементарных возбуждений полупроводников, диэлектриков и сверхпроводников, колебательные и вращательные спектры полимеров и сложных молекул [1, 2]. Это позволяет применять ТГц-излучение для диагностики онкологических заболеваний, обнаружения биологических и химических агентов, загрязнений верхних слоев почвы и лакокрасочных покрытий, контроля качества продуктов питания и медикаментов [3, 4]. Одним из основных источников ТГц-излучения стали системы, основанные на взаимодействии ультракоротких лазерных импульсов с фотопроводящими полупроводниковыми материалами – оптико-ТГц-преобразователи (ОТП) [5]. Они позволяют генерировать сверхширокополосное импульсное или же плавно перестраиваемое в широком диапазоне непрерывное ТГц-излучение, стабильно работают при комнатной температуре и не требуют мощных лазерных источников для накачки. Однако существует ряд фундаментальных ограничений, влияющих на эффективность работы ОТП, связанных с необходимостью повышения коэффициента преобразования лазерного излучения накачки в электромагнитные колебания ТГц-диапазона. Одним из таких ограничений является высокий коэффициент преломления в используемых для ОТП фотопроводниках, вследствие чего большая часть падающего лазерного излучения отражается от их поверхности [6, 7].

Наиболее успешным методом повышения эффективности ОТП является структурирование краев электродов для формирования так называемых «плазмонных решеток» [5, 8–10]. Плазмонные решетки увеличивают концентрацию фотовозбужденных носителей тока вблизи их краев, что позволяет большему числу фотоносителей достигать электродов и вносить вклад в переходной ток (фототок), а значит усиливать генерацию ТГц-импульсов. В работе [11] было впервые теоретически показано, что увеличение топологической размерности плазмонной решетки от 2D к 3D целесообразно при использовании двух пассивирующих диэлектриков и дает потенциальную возможность возбудить более высокие плазмонные моды [12]. Возбуждение таких мод приводит к увеличению коэффициента преобразования ОТП, а также расширяет его спектр излучения. Нами была предложена технология создания ОТП с 3D-плазмонными электродами с высотой (толщиной) металлизации 100 нм и аспектным соотношением между высотой электрода и периодом решетки 1:1, что позволило заметно усилить генерацию ТГц-излучения и увеличить переходной ток [7].

В противовес плазмонным решеткам, довольно привлекательным выглядит применение диэлектрических метаповерхностей [13, 14], позволяющих сфокусировать лазерный импульс накачки ОТП на суб-волновом масштабе. В отличие от широко используемых сферических и асферических линз [15–17], линза на основе диэлектрической метаповерхности (металинза) позволяет сформировать суб-волновые каустики и сосредоточить максимальное число фотовозбужденных носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника [11]. Кроме того, путем оптимизации ее диаметра и расположения относительно электродов ОТП возможно управлять фокусом каустики [5], и как следствие, влиять на мощность генерации ТГц-излучения посредством ОТП.

В настоящей работе численным методом исследовано влияние металинзы на основе одиночной диэлектрической микрочастицы, размещенной в зазоре между электродами ОТП, на процессы перераспределения энергии лазерной накачки в фотопроводящем слое. Путем оптимизации диаметра микрочастицы показано, что в области теневой поверхности микрочастицы формируется фотонная струя [18, 19], которая характеризуется сильной пространственной локализацией и высокой интенсивностью оптического поля в области фокусировки. Для уменьшения потерь на отражение импульса накачки поверхность фотопроводника была дополнительно покрыта просветляющим слоем из оксида алюминия (Al_2O_3). Показано, что благодаря оптимизации диаметра микрочастицы и подбору оптимальной толщины Al_2O_3 возможно добиться максимально эффективного пропускания импульса лазерной накачки в фотопроводник (до 1 мкм) с повышенной амплитудой пространственной локализации излучения (до 8.7 раз) и добиться значения полной ширины на уровне половинной амплитуды (FWHM) $\sim 0.34\lambda_0$ (где λ_0 – длина волны падающего излучения), что меньше дифракционного предела Аббе $0.5\lambda_0$.

Методы исследований

Электромагнитное моделирование проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics. Использовался метод конечных элементов путем численного решения дифференциальных уравнений с частными производными, суть которого заключается в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве конечных элементов – кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей [20]. Преимущества использования данного метода заключается в высокой точности результатов при приемлемых вычислительных затратах, а также в гибкости самого метода, позволяющего учитывать множество физических эффектов во время моделирования. Для оценки амплитуды пространственной локализации излучения были численно решены уравнения Максвелла в частотной области с использованием модуля «Electromagnetic Waves, Frequency Domain». Исследования были проведены для ОТП на основе полуизолирующего GaAs (далее – semi-insulate GaAs, SI GaAs), который характеризуется показателем преломления $n_{GaAs} = 3.64$. Схематичное изображение ОТП с металинзой, а также используемой модели приведено на рис. 1а и 1б, соответственно.

Модель, помимо полубесконечного фотопроводящего слоя SI GaAs, включает в себя сферическую диэлектрическую микрочастицу, а также просветляющее покрытие на основе Al_2O_3 . В качестве материала для сферической микрочастицы использовался поли-

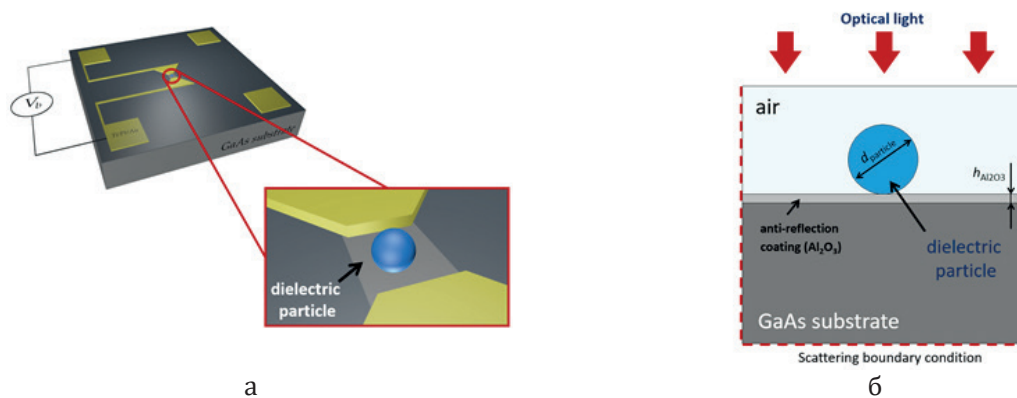


Рис. 1. ОТП для генерации ТГц-излучения:

а – схематичное изображение ОТП с металинзой на основе одиночной диэлектрической микрочастицы; б – изображение 2D-модели для электромагнитного моделирования методом конечных элементов.

метилметакрилат (ПММА) с показателем преломления $n_{particle} = 1.48$. Просветляющее сапфировое покрытие с показателем преломления $n_{Al_2O_3} = 1.75$ способствует снижению градиента между показателями преломления микрочастицы и фотопроводника SI GaAs. ОТП с металинзой взаимодействует с лазерным пучком, заданным как плоский волновой фронт с амплитудой электрического поля, ограниченной в плоскости параллельной поверхности фотопроводника по Гауссову распределению. Длина волны лазерного пучка составляет $\lambda_0 = 800$ нм с максимальной амплитудой электрического поля $E_0 = 1$ В/м. Для построения картины распределения была применена неоднородная сетка с минимальным размером ячейки $\lambda_0/8$ для области теневой поверхности микрочастицы и $\lambda_0/4$ для остальной части модели. Для внешних границ модели использованы граничные условия рассеяния (scattering boundary condition, SBC), которые представляют собой плоскости, прозрачные для всех падающих на них электромагнитных волн, исключая вторичные переотражения в модели.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2а можно наблюдать полученное с помощью электромагнитного моделирования распределение интенсивности E^2 в фотопроводящем слое ОТП с диэлектрической микрочастицей диаметром 1.2 мкм и просветляющим покрытием толщиной $h_{Al_2O_3} = 116$ нм. Видно, что в области теневой поверхности диэлектрической микрочастицы формируется фотонная струя с ярко выраженной локализацией интенсивности вблизи поверхности фотопроводника. На рис. 2б представлены сечения распределения интенсивности E^2 вдоль оси x на разной глубине фотопроводника (s – расстояние от поверхности фотопроводника). На расстоянии от поверхности фотопроводника $s = 1$ мкм амплитуда интенсивности поля E^2 уменьшается в 2 раза.

Для оценки свойств фотонной струи были использованы два параметра. Первым параметром является коэффициент усиления поля δ_{opt} , который определяется как отношение максимальной интенсивности поля в фотопроводнике при фокусировке диэлектрической микрочастицей E_{max}^2 к максимальной интенсивности в случае отсутствия микрочастицы E_0^2 :

$$\delta_{opt} = \frac{|E_{max}^2|}{|E_0^2|}.$$

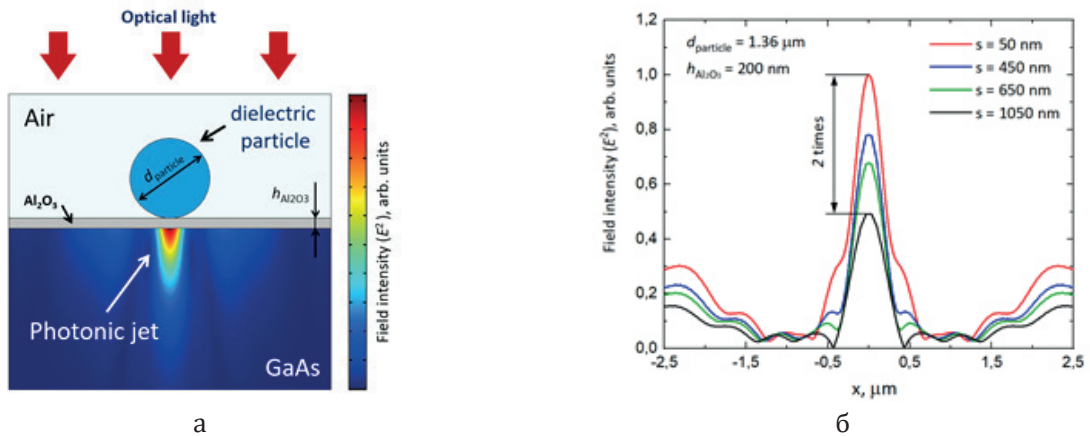


Рис. 2. Результаты электромагнитного моделирования ОТП:

а – распределение интенсивности E^2 в фотопроводящем слое ОТП с диэлектрической микрочастицей с диаметром 1.2 мкм и антиотражающим слоем толщиной $h_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 116$ нм; б – распределение интенсивности E^2 вдоль оси x на разной глубине s в фотопроводнике.

Коэффициент усиления поля δ_{opt} позволяет оценить насколько выше эффективность ОТП с металлинзой на основе одиночной диэлектрической микрочастицы по сравнению с традиционным ОТП, где волновой фронт падающего лазерного излучения взаимодействует с плоской границей фотопроводящего слоя. Второй параметр – это полная ширина на уровне половинной амплитуды (FWHM), нормированная к длине волны падающего излучения λ_0 , которая характеризует степень пространственной локализации фотонной струи. На рис. 3 представлены полученные зависимости величин δ_{opt} (а) и FWHM (б) от диаметра микрочастицы при разной толщине просветляющего слоя. Диаметр микрочастицы d_{particle} в модели варьировался в пределах 0.4–2.5 мкм, а толщина сапфирового покрытия $h_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ изменялась в диапазоне 50–200 нм.

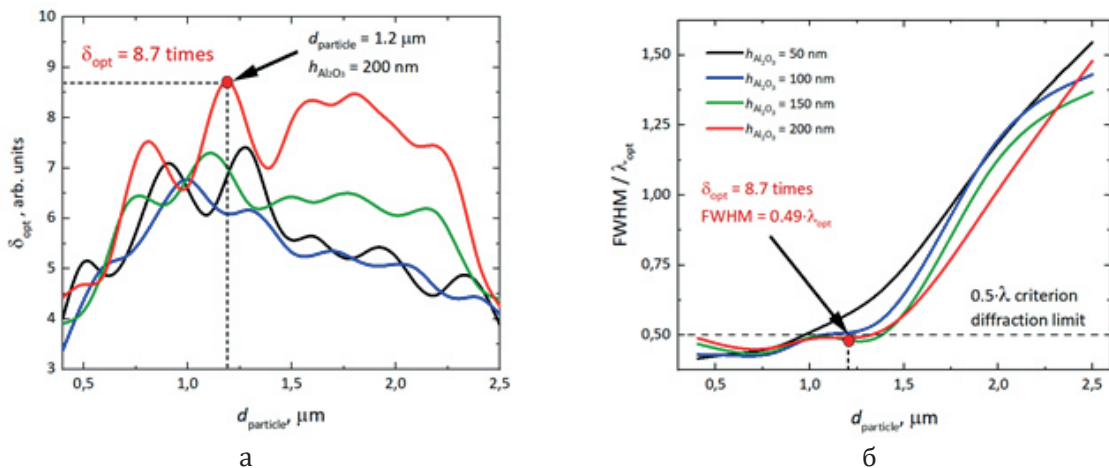


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления поля δ_{opt} (а) и полной ширины на уровне половинной амплитуды (FWHM), нормированной к длине волны падающего излучения (б), от диаметра микрочастицы при разной толщине просветляющего покрытия Al_2O_3 .

Видно, что для значений коэффициента усиления поля δ_{opt} характерны максимумы при использовании частиц диаметром от 1.0 до 1.5 мкм. Кроме того, значительное влияние оказывает просветляющий слой Al_2O_3 , который в отдельных случаях позволяет существенно повысить эффективность проникновения импульса лазерной накачки в фо-

топроводящий слой. Это связано с тем, что показатель преломления сапфира несколько больше показателя преломления микрочастицы, и сапфировый слой позволяет эффективнее передавать излучение в фотопроводник. Максимальное значение δ_{opt} составило 8.7 раз при диаметре микрочастицы 1.2 мкм и толщине антиотражающего слоя 200 нм. Кроме того, при данных размерах частицы можно получить достаточно низкое значение FWHM равное $0.49 \cdot \lambda_0$, что позволяет сосредоточить максимум плотности фотовозбужденных носителей заряда в очень узкой каустике вблизи поверхности. Отметим, что при уменьшении диаметра микрочастицы возможно добиться значений FWHM вплоть до $0.34 \cdot \lambda_0$ при сохранении коэффициента усиления δ_{opt} до 7 раз. Таким образом, предложенная конструкция металинзы на основе одиночной диэлектрической микрочастицы открывает широкие возможности для повышения эффективности работы ОТП.

Заключение

Методом численного моделирования получены картины распределения интенсивности E^2 в фотопроводящем слое ОТП при различных диаметрах микрочастицы и толщине просветляющего покрытия Al_2O_3 . Полученные распределения интенсивности E^2 , зависимости коэффициента усиления поля δ_{opt} и FWHM от диаметра микрочастицы позволяют оценить влияние металинзы на основе одиночной диэлектрической микрочастицы, размещенной на поверхности фотопроводника, на процессы локализации энергии лазерной накачки вблизи электродов ОТП. Определены оптимальный диаметр микрочастицы $d_{particle}$ и толщина антиотражающего слоя $h_{Al_2O_3}$, которые обеспечат максимальную пространственную локализацию излучения в приповерхностном слое фотопроводника при длине волны лазерного излучения $\lambda_0 = 800$ нм. Максимальный коэффициент усиления поля δ_{opt} составил 8.7 раз при диаметре микрочастицы $d_{particle} = 1.2$ мкм и толщине антиотражающего слоя $h_{Al_2O_3} = 200$ нм. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения диэлектрических металинз при проектировании фотопроводящих оптико-терагерцовых преобразователей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РТУ МИРЭА «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий».

Литература / References:

1. Pereira M.F. TERA-MIR radiation: materials, generation, detection and applications. *Opt. Quant. Electron.* 2014;46(4):491-493.
<https://doi.org/10.1007/s11082-014-9883-5>
2. Zaytsev K.I., Dolganova I.N., Chernomyrdin N.V., Katyba G.M., Gavidush A.A., Cherkasova O.P., Komandin G.A., Shchedrina M.A., Khodan A.N., Ponomarev D.S., Reshetov I.V., Karasik V.E., Skorobogatiy M., Kurlov V.N., Tuchin V.V. The progress and perspectives of terahertz technology for diagnosis of neoplasms: A review. *Journal of Optics (United Kingdom)*. 2020;22(1):013001.
<https://doi.org/10.1088/2040-8986/ab4dc3>
3. Ting H., Jing-ling S. Applications of Terahertz Spectroscopy in Illicit Drugs Detection. *PubMed*. 2013;33(9):2348-2353.
4. Musina G.R., Nikitin P.V., Chernomyrdin N.V., Dolganova I.N., Gavidush A.A., Komandin G.A., Ponomarev D.S., Potapov A.A., Reshetov I.V., Tuchin V.V., Zaytsev K.I. Prospects of terahertz technology in diagnosis of human brain tumors - A review. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering (J-BPE)*. 2020;6(2):020201.
<https://doi.org/10.18287/JBPE20.06.020201>
5. Yachmenev A.E., Lavrukhin D.V., Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Goncharov Yu.G., Spektor I.E., Khabibullin R.A., Otsuji T., Ponomarev D.S. Metallic and dielectric metasurfaces in photoconductive terahertz devices: a review. *Opt. Eng.* 2019;59(6):061608 (19 p.).
<https://doi.org/10.1117/1.OE.59.6.061608>

6. Lavrukhin D.V., Yachmenev A.E., Pavlov A.Yu., Khabibullin R.A., Goncharov Yu.G., Spector I.E., Komandin G.A., Yurchenko S.O., Chernomyrdin N.V., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Shaping the spectrum of terahertz photoconductive antenna by frequency-dependent impedance modulation. *Semicond. Sci. Technol.* 2019;34(3):034005.
<https://doi.org/10.1088/1361-6641/aaff31>
7. Lavrukhin D.V., Yachmenev A.E., Glinskiy I.A., Khabibullin R.A., Goncharov Y.G., Ryzhii M., Otsuji T., Spector I.E., Shur M., Skorobogatiy M., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Terahertz photoconductive emitter with dielectric-embedded high-aspect-ratio plasmonic grating for operation with low-power optical pumps. *AIP Advances*. 2019;9(1):015112.
<https://doi.org/10.1063/1.5081119>
8. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P. Enhancement of terahertz photoconductive antenna operation by optical nanoantennas. *Laser & Photonics Reviews*. 2017;11(1):1600199.
<https://doi.org/10.1002/lpor.201600199>
9. Yardimci N.T., Cakmakyapan S., Hemmati S., Jarrahi M. A high power broadband terahertz source enabled by three-dimensional light confinement in a plasmonic nanocavity. *Scientific Reports*. 2017;7(1):4166.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-04553-4>
10. Castro-Camus E., Alfaro M. Photoconductive devices for terahertz pulsed spectroscopy: a review. *Photon. Res.* 2016;4(3):A36-A42.
<https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000A36>
11. Park S.-G., Jin K.H., Yi M., Ye J.C., Ahn J., Jeong K.-H. Enhancement of terahertz pulse emission by optical nanoantenna. *ACS Nano*. 2012;6(3):2026-2031.
<https://doi.org/10.1021/nn204542x>
12. Catrysse P.B., Veronis G., Shin H., Shen J.-T., Fan S. Guided modes supported by plasmonic films with a periodic arrangement of subwavelength slits. *Appl. Phys. Lett.* 2006;88(3):031101.
<https://doi.org/10.1063/1.2164905>
13. Mitrofanov O., Siday T., Thompson R.J., Luk T.S., Brener I., Reno J.L. Efficient photoconductive terahertz detector with all-dielectric optical metasurface. *APL Photonics*. 2018;3(5):051703.
<https://doi.org/10.1063/1.5011420>
14. Katyba G.M., Zaytsev K.I., Dolganova I.N., Shikunova I.A., Chernomyrdin N.V., Yurchenko S.O., Komandin G.A., Reshetov I.V., Nesvizhevsky V.V., Kurlov V.N. Sapphire shaped crystals for waveguiding, sensing and exposure applications. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2018;64(4):133-151.
<https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2018.10.002>
15. Lo Y.H., Leonhardt R. Aspheric lenses for terahertz imaging. *Opt. Express*. 2008;16(20):15991-15998.
<https://doi.org/10.1364/OE.16.015991>
16. Formanek F., Brun M.-A., Umetsu T., Omori S., Yasuda A. Aspheric silicon lenses for terahertz photoconductive antennas. *Appl. Phys. Lett.* 2009;94(2):021113-021113-3.
<https://doi.org/10.1063/1.3072357>
17. Chernomyrdin N.V., Frolov M.E., Lebedev S.P., Reshetov I.V., Spector I.E., Tolstoguzov V.L., Karasik V.E., Khorokhorov A.M., Koshelev K.I., Schadko A.O., Yurchenko S.O., Zaytsev K.I. Wide-aperture aspherical lens for high-resolution terahertz imaging. *Rev. Sci. Instrum.* 2017;88(1):014703.
<https://doi.org/10.1063/1.4973764>
18. Minin I.V., Liu C.-Y., Geints Y.E., Minin O.V. Recent advances in integrated photonic jet-based photonics. *Photonics*. 2020;7(2):41.
<https://doi.org/10.3390/photonics7020041>
19. Minin I.V., Minin O.V., Glinskiy I.A., Khabibullin R.A., Malureanu R., Lavrinenko A.V., Yakubovsky D.I., Arsenin A.V., Volkov V.S., Ponomarev D.S. Plasmonic nanojet: an experimental demonstration. *Opt. Lett.* 2020;45(12):3244-3247.
<https://doi.org/10.1364/OL.391861>
20. Edsberg L. Introduction to Computation and Modeling for Differential Equations, 2nd Edition. Hoboken, New Jersey: Wiley; 2015. 288 p. ISBN: 978-1-119-01844-5

Об авторах:

Глинский Игорь Андреевич, ведущий инженер отдела разработки ИТ-решений Инжинирингового центра мобильных решений, ассистент кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: I-4334-2015, Scopus Author ID: 57190616854, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Зенченко Николай Владимирович, ведущий инженер отдела разработки ИТ-решений Инжинирингового центра мобильных решений, ассистент кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: K-2233-2015, Scopus Author ID: 56891470400, <https://orcid.org/0000-0002-7932-1821>

Пономарев Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе, ведущий научный сотрудник ФГАНУ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) (117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5). ResearcherID: K-1632-2014, Scopus Author ID: 37124831400, <https://orcid.org/0000-0002-9567-8927>

About the authors:

Igor A. Glinskiy, Leading Engineer, IT Solutions Development Department, Mobile Solutions Engineering Center, Assistant Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). ResearcherID: I-4334-2015, Scopus Author ID: 57190616854, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Nikolay V. Zenchenko, Leading Engineer, IT Solutions Development Department, Mobile Solutions Engineering Center, Assistant Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). ResearcherID: K-2233-2015, Scopus Author ID: 56891470400, <https://orcid.org/0000-0002-7932-1821>

Dmitry S. Ponomarev, Ph.D. in Physics and Math, Deputy Director, Chief Researcher at V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS) (Nagorny proezd, 7/5, Moscow, 117105, Russia). ResearcherID: K-1632-2014, Scopus Author ID: 37124831400, <https://orcid.org/0000-0002-9567-8927>

Поступила: 02.08.2020; получена после доработки: 07.10.2020; принята к опубликованию: 30.10.2020.