

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 535.015
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-50-57>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Повышение эффективности оптико-терагерцового преобразователя за счет профилированных сапфировых волокон

Н.В. Зенченко^{1, 2, 3, @},
Д.В. Лаврухин^{1, 2},
И.А. Глинский^{1, 2, 3},
Д.С. Пономарев^{1, 2}

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова
Российской академии наук, Москва, 117105 Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991 Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: zenchenko.nikolay@yandex.ru

Резюме

Цели. Цель работы – повышение эффективности фотопроводящего ТГц-излучателя большой площади на основе оптико-терагерцового преобразователя (ОТП) (излучающая область составляет $0.3 \times 0.3 \text{ мм}^2$) для генерации мощного ТГц-излучения с помощью применения в качестве фокусирующей оптики массива плотноупакованных профилированных сапфировых волокон диаметром в диапазоне 100–300 мкм.

Методы. В качестве фотопроводящей подложки использовался полубесконечный слой LT-GaAs (LT, low-temperature grown GaAs – слой GaAs, выращиваемый методом молекулярно-лучевой эпитаксии при пониженной температуре роста). Далее следуют слои Si_3N_4 и Al_2O_3 для снижения токов утечки в ОТП и уменьшения отражения импульса лазерной накачки от границы «воздух/полупроводник» (френелевские потери) соответственно. Ширина зазора составляет 10 мкм, система металлов Ti/Au используется для формирования электродов антенны и подводящих полосков. Моделирование проводилось методом конечных элементов в среде *COMSOL Multiphysics*.

Результаты. Продемонстрирована способность профилированного сапфирового волокна после оптимизации диаметра относительно параметров зазора значительно увеличить концентрацию носителей заряда в непосредственной близости к электродам ОТП. Определена интегральная эффективность фотопроводящего ТГц-излучателя большой площади с учетом микрополосковой топологии массива с характерным размером подводящих полосков, пропорциональным ширине зазора в ОТП, и с верхним (маскирующим) металлическим слоем. Максимальная локализация электромагнитного поля в непосредственной близости к краям электродов на интерфейсе «волокно/полупроводник» достигается при диаметре профилированного сапфирового волокна, равном 220 мкм.

Выводы. Путем оптимизации диаметра сапфирового волокна продемонстрирована возможность увеличения в ~40 раз локализации падающих электромагнитных волн в непосредственной близости к краям электродов ОТП по сравнению со случаем без волокна, а также повышение до ~7–10 раз общей эффективности излучателя большой площади.

Ключевые слова: терагерцовая импульсная спектроскопия, источники и детекторы ТГц-излучения, субволновая фокусировка излучения, терагерцовые оптические элементы и системы, оптико-терагерцовая конверсия, металлинза

• Поступила: 20.05.2022 • Доработана: 07.10.2022 • Принята к опубликованию: 27.01.2023

Для цитирования: Зенченко Н.В., Лаврухин Д.В., Глинский И.А., Пономарев Д.С. Повышение эффективности оптико-терагерцового преобразователя за счет профилированных сапфировых волокон. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):50–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-50-57>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Improving the efficiency of an optical-to-terahertz converter using sapphire fibers

Nikolay V. Zenchenko^{1, 2, 3, @},
Denis V. Lavrukhin^{1, 2},
Igor A. Glinskiy^{1, 2, 3},
Dmitry S. Ponomarev^{1, 2}

¹ V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105 Russia

² Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: zenchenko.nikolay@yandex.ru

Abstract

Objectives. The study aims to improve the efficiency of a large-area photoconductive terahertz (THz) emitter based on an optical-to-terahertz converter (OTC) having a radiating area of $0.3 \times 0.3 \text{ mm}^2$ for generating high-power THz radiation by using an array of close-packed profiled sapphire fibers having a diameter in the range of 100–300 μm as focusing optics.

Methods. As a photoconductive substrate, we used a semi-infinite LT-GaAs layer (low-temperature grown GaAs; GaAs layer grown by molecular beam epitaxy at a low growth temperature). Additional Si_3N_4 and Al_2O_3 layers are intended for reducing leakage currents in the OTC and reducing the reflection of the laser pump pulse from the air/semiconductor interface (Fresnel losses), respectively, at a gap width of 10 μm . For forming the antenna electrodes and feed strips, the Ti/Au metal system was used. The simulation was carried out by the finite element method in the COMSOL Multiphysics environment.

Results. The use of a profiled sapphire fiber whose diameter has been optimized with respect to the gap parameters to significantly increase the concentration of charge carriers in the immediate vicinity of the electrodes of an OTC is demonstrated. The integrated efficiency of a large-area photoconductive THz emitter was determined taking into account the microstrip topology of the array with a characteristic size of feed strips proportional to the gap width in the OTC and with the upper (masking) metal layer. The maximum localization of the electromagnetic field in close proximity to the edges of electrodes at the “fiber–semiconductor” interface is achieved with a profiled sapphire fiber diameter of 220 μm .

Conclusions. By optimizing the diameter of the sapphire fiber, the possibility of improving the localization of incident electromagnetic waves in close proximity to the edges of the OTC electrodes by ~40 times compared to the case without fiber, as well as increasing the overall efficiency of a large-area emitter by up to ~7–10 times, was demonstrated.

Keywords: pulsed terahertz spectroscopy, emitters and detectors of THz radiation, subwavelength radiation, terahertz optical elements and systems, optical-to-terahertz conversion, metalens

• Submitted: 20.05.2022 • Revised: 07.10.2022 • Accepted: 27.01.2023

For citation: Zenchenko N.V., Lavrukhin D.V., Glinskiy I.A., Ponomarev D.S. Improving the efficiency of an optical-to-terahertz converter using sapphire fibers. *Russ. Technol. J.* 2023;11(2):50–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-50-57>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптико-терагерцовые преобразователи (ОТП) широко используются в системах терагерцовой (ТГц) спектроскопии для генерации и детектирования широкополосного ТГц-излучения [1]. Благодаря «гибкости» в технологии их изготовления (возможности вариации топологии и геометрии электродов антенны, а также выбора фотопроводящего (полупроводникового) материала), ОТП представляют значительный интерес для создания систем одноканального и многоканального детектирования для визуализации (имиджинга) объектов в ТГц-диапазоне [2, 3].

Однако эффективность работы ОТП-излучателей ограничена тем, что лишь малая доля энергии импульса лазерной накачки преобразуется в электромагнитные колебания ТГц-диапазона [4, 5]. Одним из методов повышения эффективности является структурирование краев электродов путем формирования периодических металлических (плазмонных) наноструктур в зазоре антенны [4–7]. В противовес плазмонике альтернативным подходом является применение диэлектрических структур. Они не подвержены омическим потерям и перегреву с выделением Джоулева тепла, позволяют сфокусировать лазерный импульс и сформировать локальные каустики [8–10]. Локализация оптического излучения может значительно (примерно в 7 раз) повысить эффективность передачи энергии накачки в фотопроводящий слой и увеличить эффективность генерации ТГц-излучения путем увеличения плотности фототока [6]. В настоящей работе показано, каким образом можно добиться данного эффекта, используя линзы на основе профилированных сапфировых волокон (ПСВ) диаметром 100–300 мкм. Подобные волокна позволяют сфокусировать значительное количество энергии вдоль всей поверхности электродов фотопроводящего ТГц-излучателя [7].

Ранее мы теоретически показали [10], что подобное волокно позволяет сформировать субволновые локальные каустики (области максимальной концентрации носителей заряда) на границе с полупроводником. Благодаря высокому показателю преломления сапфира в широком диапазоне электромагнитного спектра [11] можно создать значительный оптический контраст на интерфейсе «волокно-полупроводник», что позволяет локализовать фотовозбужденные носители заряда принципиально вблизи электродов ОТП (при оптимальном диаметре волокна). Локализация (фокусировка) приводит к повышению эффективности передачи энергии накачки в фотопроводник и сопровождается увеличением мощности генерации ТГц-излучения благодаря увеличению плотности фототока [12].

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данной работе предлагается концепция фотопроводящего ТГц-излучателя большой площади на основе ОТП (излучающая область составляет $0.3 \times 0.3 \text{ мм}^2$) для генерации мощного ТГц-излучения, где в качестве фокусирующей оптики используется массив плотно упакованных ПСВ диаметром в диапазоне 100–300 мкм, производства Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (Россия). Модель ОТП, а также поперечный срез структуры, приведены на рис. 1, где d – диаметр ПСВ, g – размер зазора между электродами, a – диаметр пучка импульсной лазерной накачки.

ОТП был создан в Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Россия. Структура ОТП представляла собой последовательность полупроводниковых и диэлектрических слоев. В качестве фотопроводящей подложки использовался слой LT-GaAs (LT, low-temperature grown GaAs – слой GaAs, выращенный методом

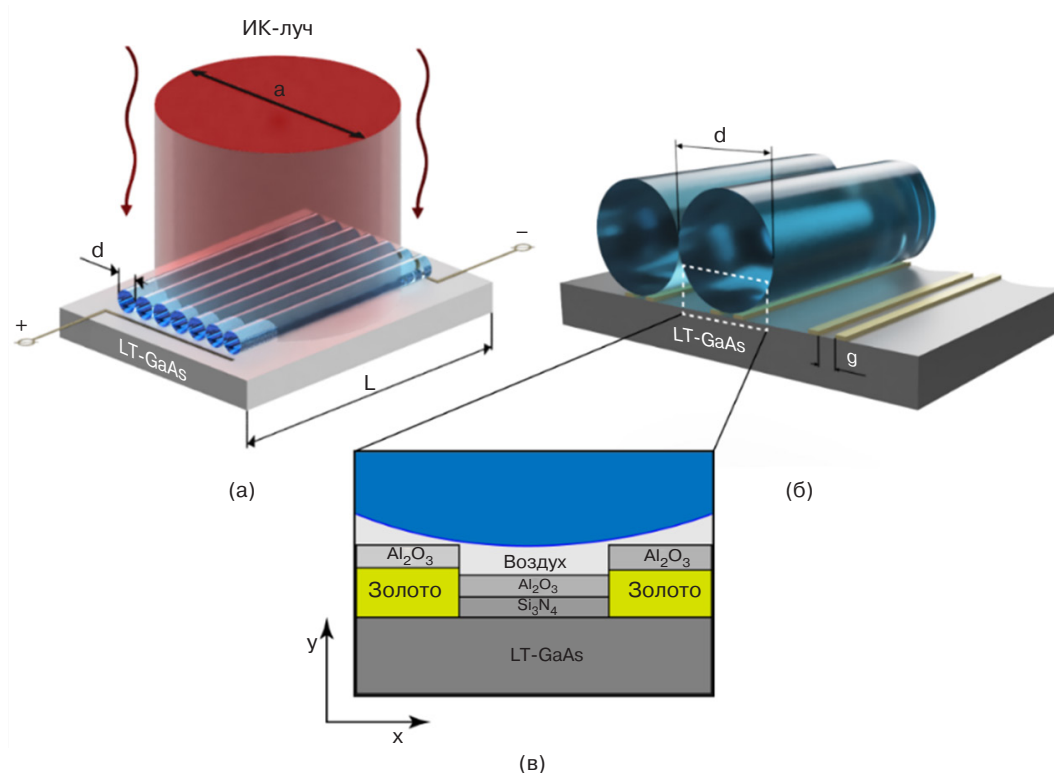


Рис. 1. Модель ОТП (а); увеличенное изображение элемента ОТП с фокусирующей оптикой на основе ПСВ (б); поперечное сечение (в)

молекулярно-лучевой эпитаксии при пониженной температуре роста). Далее следовали слои Si₃N₄ и Al₂O₃ для снижения токов утечки в ОТП и уменьшения френелевского отражения лазерной накачки от границы «воздух/полупроводник» соответственно. Ширина зазора составляла 10 мкм. Для формирования электродов антенны и подводящих полосок использовалось золото. Все технологические процедуры (в частности, нанесение Si₃N₄, Al₂O₃ и золота) производились в ИСВЧПЭ РАН. Далее на основе полученной подложки создавался ОТП.

Электромагнитный расчет проводился методом конечных элементов в программной среде *COMSOL Multiphysics*¹. Размеры ячеек конечно-элементной сетки варьировались от $\lambda/8$ для области зазора до $\lambda/4$ для остальных областей (λ – длина волны импульса лазерной накачки, в расчетах $\lambda = 780$ и 1560 нм). Стоит отметить, что полученные распределения электромагнитных полей для обеих длин волн почти не отличаются вследствие того, что оптические свойства (в частности, показатель преломления) образцов ПСВ имеют различия только во втором знаке после запятой. Вектор распространения электрического поля импульса лазерной накачки ориентирован по нормали к поверхности ОТП. Мы использовали параметр (x/g) , где x – латеральная

координата, чтобы сделать решение безразмерным и масштабировать результаты моделирования для различных диаметров ПСВ (d) и размеров зазора (g). Результаты моделирования пространственного распределения квадрата электрического поля электромагнитной волны (ЭМВ) для трех различных значений $d/g = 14, 18$ и 22 приведены на рис. 2.

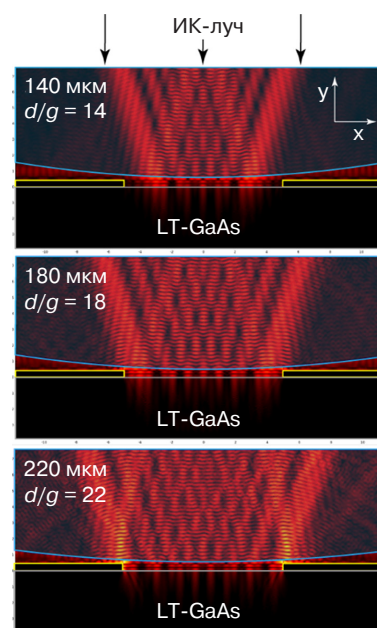


Рис. 2. Распределение ЭМВ для различных значений параметра d/g

¹ <https://www.comsol.ru/>. Дата обращения 01.02.2022. / Accessed February 01, 2022 (in Russ.).

На картинах распределения ЭМВ отчетливо видны субволновые каустики (характерные области максимальной локализации поля лазерной накачки в полупроводнике), формируемые вблизи электродов ОТП. Также видно, что размер каустики увеличивается по мере увеличения соотношения (d/g) и достигает своего максимума (другими словами, максимальной локализации энергии импульса лазерной накачки) при значении $d/g = 22$.

Для качественной оценки числа фотовозбужденных носителей заряда, которые могут достигнуть электродов ОТП до их рекомбинации в полупроводнике, мы проинтегрировали интенсивность электромагнитного поля в области зазора ОТП следующим образом:

$$I = \int_{-g/2}^{g/2} |E^2(x)| \exp(-(|x - g/2|)/r_d) dx,$$

где r_d характеризует дрейфовую длину для носителей заряда. Типичные значения $r_d = 100, 300$ и 500 нм были выбраны, исходя из характерных значений насыщенных скоростей и времен жизни носителей в LT-GaAs [13, 14].

Далее, для количественной оценки степени локализации импульса лазерной накачки в зазоре ОТП мы ввели коэффициент увеличения интенсивности ЭМВ (K), который определяется соотношением между интегралами I_s и I_0 , где I_s рассчитывается для случая ОТП с ПСВ, а I_0 – без него. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

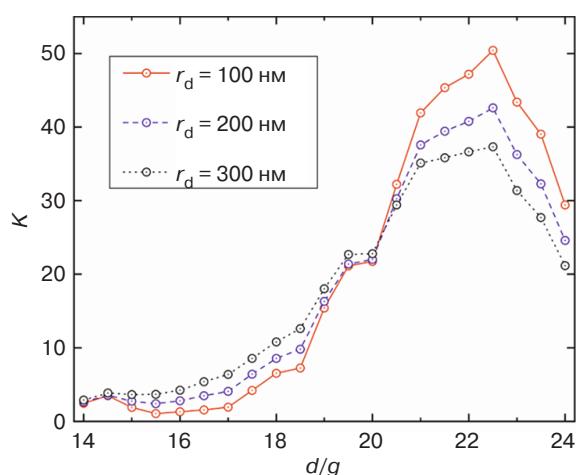


Рис. 3. Коэффициент увеличения интенсивности ЭМВ в зазоре

Видно, что все три кривые (соответствующие разным значениям r_d) сохраняют свою форму, что подтверждает корректность расчета, а величина коэффициента K монотонно растет с увеличением параметра d/g , достигая своего максимума ~ 40 при

$d/g = 22$. Важно отметить, что данное значение характеризует случай, когда субволновые каустики располагаются строго у краев электродов ОТП, позволяя тем самым большему числу фотовозбужденных носителей заряда внести вклад в генерацию ТГц-излучения. Последнее, в свою очередь, приведет к увеличению генерируемого ОТП фототока и потенциально повысит эффективность оптико-ТГц-преобразования.

На основе полученных результатов расчета, интегральная эффективность K фотопроводящего ТГц-излучателя большой площади с учетом микрополосковой топологии массива с характерным размером подводящих полосков, пропорциональным ширине зазора в ОТП, и с верхним (маскирующим) металлическим слоем может быть оценена как:

$$K \sim I_s(a/d)/I_0(a/4g) = 4K(d/g)/(d/g),$$

где параметр a характеризует типичный диаметр пятна импульса лазерной накачки (1.0–1.5 мм), а цифра 4 соответствует периоду микрополосковой структуры массива, состоящей из двух фотопроводящих зазоров и двух ширин подводящих полосков.

Также нужно отметить пути возможной оптимизации конструкции ТГц-излучателя большой площади с применением ПСВ. Как было показано на рис. 1а, лазерный пучок покрывает $n = a/d$ волокон. Для увеличения мощности ТГц-генерации излучения логично уменьшить как диаметр ПСВ, так и размер зазора. Однако уменьшение зазора эквивалентно резкому возрастанию напряженности электрического поля вследствие уменьшения расстояния между двумя соседними металлическими полосками. Это сильно повышает вероятность электрического пробоя в LT-GaAs (и тем более в фотопроводниках для накачки ИК лазерным излучением – с относительно малой шириной запрещенной зоны, например InGaAs). Другими словами, «нижние» граничные значения для d и g на практике составят: $g \sim 3\text{--}5$ мкм, $d \sim 100$ мкм. Кроме того, любое уменьшение ширины зазора накладывает дополнительные требования на точность совмещения ПСВ с поверхностью образца ОТП. По нашим оценкам, число расположенных по соседству излучающих элементов с микрополосковой топологией для ТГц-излучателя большой площади не должно превышать 10. В таком случае комбинация «ОТП + ПСВ» должна работать максимально эффективно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложено использовать массив линз из сапфирового волокна для увеличения эффективности работы фотопроводящего ТГц-излучателя

большой площади. С помощью численного моделирования показано, что каждая линза обеспечивает пространственное перераспределение плотности фотовозбужденных носителей заряда в зазоре между электродами единичной антенны. Путем оптимизации диаметра сапфирового волокна продемонстрирована возможность увеличения локализации падающих ЭМВ в непосредственной близости к краям электродов ОТП в ~ 40 раз по сравнению со случаем без волокна, а также повышение до $\sim 7\text{--}10$ раз общей эффективности излучателя большой площади.

Стоит отметить, что на практике падающий лазерный луч имеет диаметр 1.0–1.5 мм. Таким образом, при $d = 220$ мкм и $g = 10$ мкм число пар полосковых линий на кристалле ТГц-излучателя большой площади будет около 5. Поэтому для повышения производительности ТГц-излучателя большой площади можно использовать 10 пар полосковых линий с зазором 5 мкм ($d = 110$ мкм).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РТУ МИРЭА «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий». Модель образца ОТП была предложена в рамках гранта Российского научного фонда

№ 18-79-10195, а работы по численному моделированию проводились при поддержке гранта Фонда содействия инновациям № 16298ГУ/2021.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the RTU MIREA grant (Innovations in the Implementation of Priority Areas for the Development of Science and Technology). The design on an OTC was developed within the Russian Scientific Foundation grant No. 18-79-10195 while the simulations were supported by the Fund for Assistance to Small Innovative Enterprises, grant No. 16298GU/2021.

Вклад авторов

Н.В. Зенченко – численное моделирование ОТП.

Д.В. Лаврухин – разработка методики вычисления коэффициента увеличения интенсивности ЭМВ в ОТП.

И.А. Глинский – численное моделирование ОТП.

Д.С. Пономарев – руководство проектом.

Authors' contributions

N.V. Zenchenko – numerical simulation of OTC.

D.V. Lavrukhin – methodology for calculating the enhancement coefficient for the intensity of the EMW in the OTC.

I.A. Glinskiy – numerical simulation of OTC.

D.S. Ponomarev – project management.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Yachmenev A.E., Pushkarev S.S., Reznik R.R., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S. Arsenides-and related III-V materials-based multilayered structures for terahertz applications: Various designs and growth technology. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 2020;66(2):100485. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2020.100485>
2. Gueroboukha H., Nallappan K., Skorobogatiy M. Toward real-time terahertz imaging. *Adv. Opt. Photonics.* 2018;10(4):843–938. <https://doi.org/10.1364/AOP.10.000843>
3. Henri R., Nallappan K., Ponomarev D.S., Gueroboukha H., Lavrukhin D.V., Yachmenev A.E., Khabibullin R.A., Skorobogatiy M. Fabrication and characterization of an 8×8 terahertz photoconductive antenna array for spatially resolved time domain spectroscopy and imaging applications. *IEEE Access.* 2021;9:117691–117702. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3106227>
4. Yachmenev A.E., Lavrukhin D.V., Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Goncharov Y.G., Spektor I.E., Khabibullin R.A., Otsuji T., Ponomarev D.S. Metallic and dielectric metasurfaces in photoconductive terahertz devices: a review. *Optical Engineering.* 2019;59(6):061608 (19 p.). <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.6.061608>
5. Yardimci N.T., Jarrahi M. Nanostructure-enhanced photoconductive terahertz emission and detection. *Small.* 2018;14(44):1802437. <https://doi.org/10.1002/sml.201802437>
6. 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>
7. 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>
8. Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Ponomarev D.S. All-dielectric metalens based on a single colloidal particle for photoconductive optical-to-terahertz switches. *Russ. Technol. J.* 2020;8(6):78–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-78-86>
9. Зенченко Н.В., Лаврухин Д.В., Гончаров Ю.Г., Яковлев Е.В., Зайцев К.И., Пономарев Д.С. Субдифракционные локальные каустики в ТГц антеннах с металлоповерхностями. В сб.: *XI Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники*. М.: НИЯУ МИФИ; 2020. С. 107–108. URL: <http://www.mokerov.ru/сборник-трудов-2-2020/>

- [Zenchenko N.V., Lavrukhin D.V., Goncharov Yu.G., Yakovlev E.V., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Subdiffractional local caustics in THz antennas with metasurfaces. In: *The 10th International Scientific and Practical Conference on the physics and technology of nanoheterostructural microwave electronics, MOKEROV READINGS*. Moscow: NIYaU MIFI; 2020. P. 107–108 (in Russ.). Available from URL: <http://www.mokerov.ru/сборник-трудов-2-2020/>]
10. Zenchenko N.V., Lavrukhin D.V., Goncharov Yu.G., Frolov T.V., Katyba G.M., Khabibullin R.A., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Фокусирующие элементы на основе профилированного сапфира для усиления генерации терагерцевой излучения. В сб.: *XII Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники*. М.: НИЯУ МИФИ; 2021. С. 101–102. URL: <http://www.mokerov.ru/сборник-трудов-4/> [Zenchenko N.V., Lavrukhin D.V., Goncharov Yu.G., Frolov T.V., Katyba G.M., Khabibullin R.A., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Focusing elements based on sapphire fibers aimed at the enhancement of terahertz radiation generation. In: *The 12th International Scientific and Practical Conference on the physics and technology of nanoheterostructural microwave electronics, MOKEROV READINGS*. Moscow: NIYaU MIFI; 2021. P. 101–102 (in Russ.). Available from URL: <http://www.mokerov.ru/сборник-трудов-4/>]
 11. Katyba G., Zaytsev K., Dolganova I., Shikunova I., Chernomyrdin N., Yurchenko S., Komandin G., Reshetov I., Nesvizhevsky V., Kurlov V. Sapphire shaped crystals for waveguiding, sensing and exposure applications. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 2018;64(4): 133–151. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2018.10.002>
 12. Lai W., Abdulmunem O.M., Pino P., Pelaz B., Parak W.J., Zhang Q., Zhang H. Enhanced terahertz radiation generation of photoconductive antennas based on manganese ferrite nanoparticles. *Sci. Rep.* 2017;7:46261. <https://doi.org/10.1038/srep46261>
 13. Roux J.-F., Coutaz J.-L., Krotkus A. Time-resolved reflectivity characterization of polycrystalline low-temperature-grown GaAs. *Appl. Phys. Lett.* 1999;74(17):2462. <https://doi.org/10.1063/1.123881>
 14. Liliental-Weber Z., Cheng H.J., Gupta S., Whitaker J., Nichols K., Smith F.W. Structure and carrier lifetime in LT-GaAs. *J. Electron. Mater.* 1993;22(12):1465–1469. <https://doi.org/10.1007/BF02650000>

Об авторах

Зенченко Николай Владимирович, научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5); научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38); старший преподаватель кафедры наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zenchenko.nikolay@yandex.ru. Scopus Author ID 56891470400, ResearcherID K-2233-2015, SPIN-код РИНЦ 7667-6535, <https://orcid.org/0000-0002-7932-1821>

Лаврухин Денис Владимирович, научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5); научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38). E-mail: denis_lavruhin@mail.ru. Scopus Author ID 55794617500, ResearcherID K-2107-2014, SPIN-код РИНЦ 4006-0978, <https://orcid.org/0000-0002-8594-7855>

Глинский Игорь Андреевич, научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5); научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38); старший преподаватель кафедры наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: glinskiy.igor@yandex.ru. Scopus Author ID 57190616854, ResearcherID I-4334-2015, SPIN-код РИНЦ 6254-0273, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Пonomarev Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент, заместитель директора по научной работе, ведущий научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный проезд, д. 7, стр. 5); ведущий научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38). E-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru. Scopus Author ID 37124831400, ResearcherID K-1632-2014, SPIN-код РИНЦ 6099-9599, <https://orcid.org/0000-0002-9567-8927>

About the authors

Nikolay V. Zenchenko, Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia); Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (38, Vavilova ul., Moscow, 119991 Russia); Senior Lecturer, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zenchenko.nikolay@yandex.ru. Scopus Author ID 56891470400, ResearcherID K-2233-2015, RSCI SPIN-code 7667-6535, <https://orcid.org/0000-0002-7932-1821>

Denis V. Lavrukhin, Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia); Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (38, Vavilova ul., Moscow, 119991 Russia). E-mail: denis_lavruhin@mail.ru. Scopus Author ID 55794617500, ResearcherID K-2107-2014, RSCI SPIN-code 4006-0978, <https://orcid.org/0000-0002-8594-7855>

Igor A. Glinskiy, Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia); Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (38, Vavilova ul., Moscow, 119991 Russia); Senior Lecturer, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: glinskiy.igor@yandex.ru. Scopus Author ID 57190616854, ResearcherID I-4334-2015, RSCI SPIN-code 6254-0273, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Dmitry S. Ponomarev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Deputy Director, Leading Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia); Leading Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (38, Vavilova ul., Moscow, 119991 Russia). E-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru. Scopus Author ID 37124831400, ResearcherID K-1632-2014, RSCI SPIN-code 6099-9599, <https://orcid.org/0000-0002-9567-8927>