

07

Повышение эффективности лазерного возбуждения оптоэлектронного терагерцевого источника при помощи массива ближнепольных сапфировых микролинз

© Д.В. Лаврухин¹, Р.Р. Галиев¹, Н.В. Зенченко¹, Р.А. Хабибуллин¹, В.Н. Курлов², Ю.Г. Гончаров³, К.И. Зайцев³, С.В. Гарнов³, Д.С. Пономарев^{1,3}

¹ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия

² Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

E-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 мая 2025 г.

В окончательной редакции 2 июля 2025 г.

Принято к публикации 8 июля 2025 г.

Экспериментально верифицирован оригинальный подход к локализации энергии импульса лазерного возбуждения в оптоэлектронном терагерцевом излучателе большой площади за счет массива микролинз из профилированных сапфировых волокон. Показано, что использование профилированных сапфировых волокон обеспечивает $\simeq 5$ -кратное увеличение мощности генерируемого терагерцевого излучения, увеличивая на 6.5 dB отношение сигнал/шум спектрометра при ширине спектральной полосы 2.5 THz.

Ключевые слова: терагерцевое излучение, терагерцевые излучатели, фотопроводящая антенна, профилированное сапфировое волокно, микролинза.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.19.61151.20384

Импульсная терагерцевая (THz) спектроскопия активно развивается и применяется для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач [1]. Среди разнообразных существующих источников и детекторов THz-импульсов [2,3] наибольшее распространение благодаря своей простоте, надежности и гибкости (за счет применения оригинальных топологий электродов) получили оптоэлектронные (фотопроводящие) устройства с возбуждением лазерными импульсами фемтосекундной длительности. При этом низкая эффективность преобразования энергии лазерного возбуждения в THz-излучение является одним из ключевых стимулов исследований в данном направлении.

Ранее мы предложили использовать профилированное сапфировое волокно (ПСВ) в качестве эффективной ближнепольной микролинзы, позволяющей при определенных условиях [4] локализовать лазерную накачку вблизи краев электродов. В настоящей работе проведена экспериментальная верификация данного подхода на примере оптоэлектронного излучателя большой площади (ОИБП), который в отличие от привычного, т.е. единичного источника, генерирует THz-излучение повышенной мощности [5]; предложена оригинальная оснастка для точной установки ПСВ напротив электродов ОИБП. При лазерной накачке с длиной волны 780 nm со средней мощностью всего $P_{opt} = 20$ mW использование ПСВ обеспечило $\simeq 5$ -кратное увеличение мощности генерируемого THz-излучения, увеличив на 6.5 dB отношение сигнал/шум спектрометра при ширине спектральной полосы 2.5 THz.

На рис. 1,а представлен образец ОИБП с оригинальной микролинзой на основе ПСВ. Рост кристаллов ПСВ с гладкими боковыми поверхностями проводился по методу Степанова из мениска расплава, сформированного через молибденовую матрицу (edge-defined film-fed growth, EFG) [6]. По совокупности приведенных далее технологических соображений выбран диаметр волокон $d = 280$ μ m. Во-первых, вырастить из расплава одинаковые высококачественные ПСВ меньшего диаметра трудно. Во-вторых, волокна должны быть достаточно прочными для манипуляций по сборке ОИБП. Наконец, ширина набора из расположенных в ряд трех-семи волокон должна быть сопоставима с диаметром пучка лазерного возбуждения (по уровню мощности $1/e^2$), который в нашем случае составляет ~ 1.5 – 2.0 mm. Топология чипа ОИБП представляла собой пять расположенных в ряд полосковых одиночных THz-излучателей с парными электродами длиной 3.2 mm, зазором $g = 20$ μ m и периодом 350 μ m. Для исключения деструктивной интерференции THz-излучения от электродов смежных излучателей в дальней волновой зоне, а также для уменьшения темнового тока (утечки) в низкотемпературном слое GaAs (low-temperature grown GaAs, LT-GaAs) вытравлена мезаструктура для разделения соседних излучателей (вставка на рис. 2) [7]. В процессе сборки ОИБП над каждым излучателем располагается ПСВ, при этом оснастка с ячейками для его укладки изготавливалась по простой и общедоступной технологии 3D-фотополимерной печати. Пространственное разрешение фотополимерной печати составило $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 35 \times 35 \times 30$ μ m. Площадь накачива-

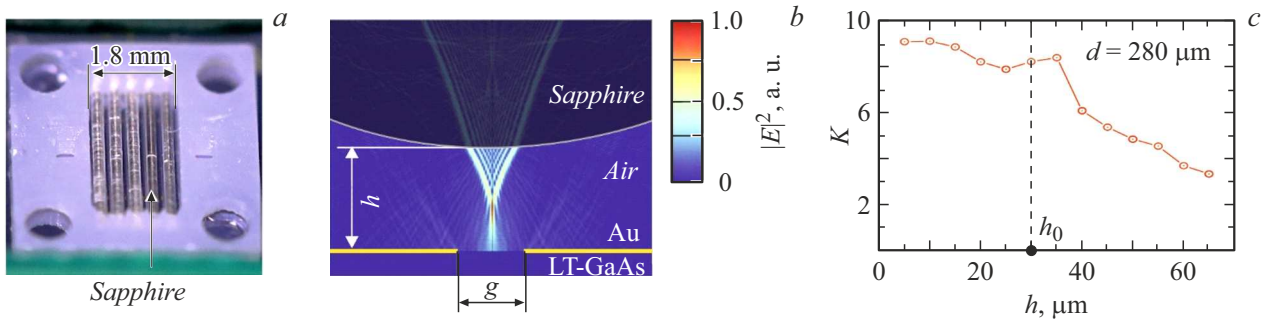


Рис. 1. Концепция ОИБП с ПСВ. *a* — фотография изготовленного ОИБП, содержащего пять волокон; *b* — численная модель накачки единичного полоскового излучателя через ПСВ для оптимизации воздушного зазора h (картина распределения лазерного возбуждения $\sim |E|^2$ с волокном соответствует $h_0 = 30 \mu\text{m}$); *c* — рассчитанный для различных значений воздушного зазора коэффициент усиления мощности возбуждения $K(h)$.

емой области ОИБП составила $3.2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$. Конструкция оснастки обеспечила фиксированное расстояние между волокном и поверхностью ОИБП (воздушный зазор) $h_0 = 30 \mu\text{m}$, что было подтверждено прямыми измерениями микрометром. Для прецизионного совмещения волокон в оснастке относительно чипа ОИБП между соседними электродами были сформированы специальные продольные и поперечные метки методом фотолитографии. Проведенные оценки показали, что погрешность совмещения составила $\sim 3\text{--}5 \mu\text{m}$.

В качестве количественной меры влияния ближнепольной фокусировки лазерного возбуждения вблизи границы ПСВ/фотопроводник на генерацию THz-излучения в ОИБП был использован коэффициент усиления мощности (K). Коэффициент K определялся отношением интегральных мощностей возбуждения с волокнами и без них. Как было отмечено выше, предлагаемая экспериментальная реализация ОИБП с ПСВ подразумевает наличие тонкого воздушного зазора (h) между нижней поверхностью волокна и ОИБП, который отсутствовал в первоначальной теоретической концепции. Расчеты пространственных распределений мощности лазерного возбуждения $\sim |E|^2$ при разном параметре h для ПСВ диаметром $d = 280 \mu\text{m}$ (рис. 1, *b*) осуществлялись численным решением уравнений Максвелла в программной среде COMSOL Multiphysics™. Далее аналогично работе [4] выполнялось интегрирование значений $|E|^2$ по зазору между электродами g . В качестве фотопроводника выбран выращенный методом молекулярно-лучевой эпитаксии слой LT-GaAs, для которого длина дрейфа носителей заряда $\sim 1.0 \mu\text{m}$. На основе рассчитанной зависимости $K(h)$, приведенной на рис. 1, *c*, для 3D-печати оснастки выбран воздушный зазор $h_0 \approx 30 \mu\text{m}$. Видно, что рассчитанный параметр h_0 обеспечивает $K \approx 8.2$.

Для проведения сравнительного анализа были изготовлены два образца ОИБП: в первом использовалась оснастка с ПСВ, а в другом — без волокон. Экспериментальные исследования образцов ОИБП проводились с помощью импульсного THz-спектрометра на основе

волоконного фемтосекундного лазера Avesta EFOA-SH с длиной волны 780 nm , длительностью импульсов $\sim 100 \text{ fs}$ и частотой следования импульсов 70 MHz [8]. Лазерный луч разделялся на два пучка: для возбуждения образцов и для зондирования фотопроводящего детектора TERA-8 (Menlo Systems, Германия). При этом средняя мощность лазерного возбуждения ОИБП составляла всего $P_{\text{opt}} = 20 \text{ mW}$. Лазерный луч имел диаметр $(1/e^2) \sim 1.5 \text{ mm}$, поэтому для исключения нежелательных потерь он фокусировался на поверхности образцов в пятно эллиптической формы посредством длиннофокусной цилиндрической линзы. Напряжение смещения ОИБП имело форму меандра с частотой 20 kHz и амплитуду $U_b = 40 \text{ V}$. Для согласования источника и детектора THz-излучения со свободным пространством использовались две гиперполусферические кремниевые линзы диаметром 12 mm . Средний фототок i_{ph} для образцов ОИБП измерялся по падению напряжения на резисторе 500Ω .

На рис. 2, *a* приведены экспериментальные спектры THz-излучения от ОИБП с ПСВ и без волокон. Видно, что возникающая в случае ПСВ ближнепольная локализация лазерного возбуждения вблизи краев электродов не влияет на форму и ширину спектра, но при этом обеспечивает $\simeq 5$ -кратный прирост THz-мощности (прирост 6.5 dB к отношению сигнал/шум), что хорошо коррелирует с результатами моделирования, представленными на рис. 1, *c*. На рис. 2, *b* показаны зависимости фототока i_{ph} для ОИБП с ПСВ и без волокон от напряжения смещения U_b . Видно, что при малом смещении кривые практически совпадают, однако при $U_b > 13 \text{ V}$ начинают различаться. Это можно отнести к некоторой неточности укладки ПСВ в ячейки, приводящей к смещению областей локализации лазерного возбуждения относительно краев электродов. В таком случае более сильное электрическое поле смещения увеличивает эффективную длину дрейфа носителей заряда, способствуя достижению ими электродов, т.е. нивелирует погрешность укладки ПСВ. При $U_b = 40 \text{ V}$ разница в мощностях THz-излучения для

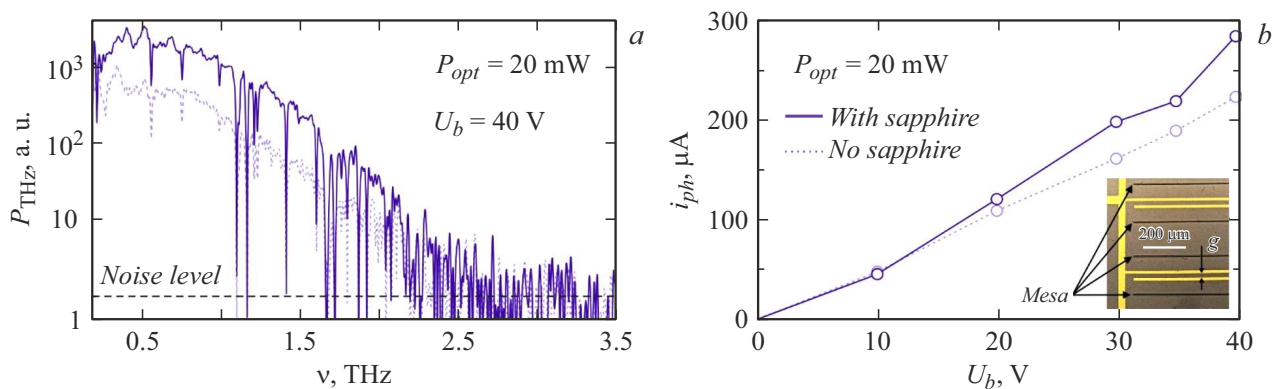


Рис. 2. Экспериментальные исследования ОИБП. Сравнительные спектры THz-излучения (а) и средние фототоки i_{ph} (b) для ОИБП с ПСВ (сплошная кривая) и без волокон (пунктирная кривая). На вставке — микроскопическое изображение участка поверхности фотопроводника с электродами. Mesa — вытравленная мезаструктура в фотопроводнике.

ОИБП с ПСВ и без волокон составляет менее 10 раз (рис. 2, а), что коррелирует с $\approx 30\%$ приростом в фототоке при том же напряжении смещения на рис. 2, б.

Таким образом, в работе экспериментально верифицирован оригинальный подход, направленный на локализацию излучения лазерного возбуждения в ОИБП с помощью массива плотноупакованных сапфировых микролинз. Зарегистрировано ≈ 5 -кратное увеличение мощности THz-излучения, приводящее к приросту отношения сигнал/шум на 6.5 dB для источника с ПСВ. Отметим, что использование более мощных фемтосекундных лазеров, например Ti:Sapphire, а также приложение к электродам ОИБП более высокого напряжения смещения может дополнительно обеспечить кратное возрастание мощности THz-излучения. Более того, предложенный в работе подход может быть легко применен к оптоэлектронным THz-детекторам большой площади [9] для увеличения их чувствительности.

Финансирование работы

Работа по изготовлению ОИБП с ПСВ выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“. Измерения спектральных характеристик ОИБП с волокном и без волокон выполнены в рамках гранта РФ 25-79-30006.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Koch, D. Mittleman, J. Ornik, E. Castro-Camus, Nat. Rev. Meth. Primers, **3**, 48 (2023). DOI: 10.1038/s43586-023-00232-z

- [2] Д.С. Пономарёв, А.Э. Ячменев, Д.В. Лаврухин, Р.А. Хабибуллин, Н.В. Черномырдин, И.Е. Спектор, В.Н. Курлов, В.В. Кведер, К.И. Зайцев, УФН, **194** (1), 2 (2024). DOI: 10.3367/UFNr.2023.07.039503 [D.S. Ponomarev, A.E. Yachmenev, D.V. Lavrukhin, R.A. Khabibullin, N.V. Chernomyrdin, I.E. Spektor, V.N. Kurlov, V.V. Kveder, K.I. Zaytsev, Phys. Usp., **67** (1), 3 (2024). DOI: 10.3367/UFNe.2023.07.039503].
- [3] M.S. Vitiello, L. Viti, Appl. Phys. Rev., **12**, 011321 (2025). DOI: 10.1063/5.0199461
- [4] Д.С. Пономарев, Д.В. Лаврухин, Н.В. Зенченко, И.А. Глинский, Р.А. Хабибуллин, В.Н. Курлов, К.И. Зайцев, Письма в ЖТФ, **48** (23), 11 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.23.53944.19332 [D.S. Ponomarev, D.V. Lavrukhin, N.V. Zenchchenko, I.A. Glinskiy, R.A. Khabibullin, V.N. Kurlov, K.I. Zaytsev, Tech. Phys. Lett., **48** (12), 8 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.12.54936.19332].
- [5] A. Singh, J. Li, A. Pashkin, R. Rana, S. Winnerl, M. Helm, H. Schneider, Opt. Express, **29** (13), 19920 (2021). DOI: 10.1364/OE.427247
- [6] G.M. Katyba, K.I. Zaytsev, I.N. Dolganova, N.V. Chernomyrdin, V.E. Ulitko, S.N. Rossolenko, I.A. Shikunova, V.N. Kurlov, Prog. Cryst. Growth Charact. Mater., **67** (3), 100523 (2021). DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2021.100523
- [7] D.S. Ponomarev, D.V. Lavrukhin, I.A. Glinskiy, A.E. Yachmenev, N.V. Zenchchenko, R.A. Khabibullin, T. Otsuji, Yu. Goncharov, K.I. Zaytsev, Opt. Lett., **48** (5), 1220 (2023). DOI: 10.1364/OL.486431
- [8] Д.В. Лаврухин, Ю.Г. Гончаров, Р.А. Хабибуллин, К.И. Зайцев, Д.С. Пономарев, Письма в ЖТФ, **50** (8), 12 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57513.19839 [D.V. Lavrukhin, Yu.G. Goncharov, R.A. Khabibullin, K.I. Zaytsev, D.S. Ponomarev, Tech. Phys. Lett., **50** (4), 52 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57513.19839].
- [9] P.-K. Lu, D. Turan, M. Jarrahi, Opt. Express, **28**, 26324 (2020). DOI: 10.1364/OE.400380