

07.3

Локализация энергии лазерного излучения в оптико-терагерцевом преобразователе ультракоротких ИК-импульсов при помощи профилированных сапфировых волокон

© Д.С. Пономарев¹, Д.В. Лаврухин^{1,2}, Н.В. Зенченко³, И.А. Глинский³, Р.А. Хабибуллин^{1,2},
В.Н. Курлов⁴, К.И. Зайцев⁵

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

⁴ Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

⁵ Федеральный исследовательский центр „Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН“, Москва, Россия
E-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 августа 2022 г.

В окончательной редакции 21 сентября 2022 г.

Принято к публикации 10 октября 2022 г.

Предложен оригинальный подход к пространственной локализации фотовозбужденных носителей заряда в оптико-терагерцевом преобразователе — фотопроводящей антенне — с помощью фокусирующего элемента на основе профилированных сапфировых волокон. Путем численного моделирования показано, что при определенном соотношении между диаметром волокна и размером зазора антенны ($d/g \sim 22.5$) возможно в ~ 35 раз увеличить интенсивность излучения лазерной накачки вблизи электродов. В таком случае формируются субволновые каустики электрического поля электромагнитной волны, которые располагаются вблизи краев электродов антенны, что потенциально дает возможность увеличения эффективности оптико-терагерцевого преобразования.

Ключевые слова: терагерцевая частота, терагерцевые излучатели, полупроводники, фотопроводящая антенна, ИК-накачка.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.23.53944.19332

Спектрометры и системы построения изображений на основе фотопроводящих антенн (ФПА) для преобразования энергии ультракоротких импульсов лазерной накачки в электромагнитные колебания терагерцевого (THz) диапазона частот активно применяются для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач [1–3]. Использование ФПА в оптической схеме спектрометра с временным разрешением (time-domain spectroscopy, TDS) дает возможность одновременно получать информацию об амплитуде и фазе принимаемого THz-излучения в широкой полосе частот, что повышает эффективность алгоритмов восстановления изображений в задачах томографии и неразрушающего контроля [4]. Одним из актуальных направлений развития THz-техники, призванным сделать TDS-системы более компактными и доступными по цене, является переход к накачке ФПА ИК-волоконными лазерами без умножения частоты (с длиной волны в диапазоне 1.03–1.56 μm). Для этого необходим переход к ФПА на основе узкозонных фотопроводников, например InGaAs.

Несмотря на развитие технологии и преимущества узкозонных материалов [5,6], работа ФПА-излучателя на их основе характеризуется эффективностью преобразования импульса лазерной накачки в электромаг-

нитные колебания THz-диапазона [7,8] не более $\sim 1\%$, что требует продолжения поиска новых конструктивных решений.

В настоящей работе предложен оригинальный подход к увеличению эффективности преобразования за счет использования специального фокусирующего элемента — профилированного сапфирового волокна (ПСВ), расположенного на поверхности ФПА. Выбор ПСВ продиктован его высоким показателем преломления в широком диапазоне электромагнитного спектра, что создает значительный оптический контраст на границах волокно/полупроводник и волокно/воздух [9]. Путем численного моделирования было показано, что при определенном соотношении между диаметром волокна и шириной зазора ФПА ($d/g \sim 22.5$) возможно увеличить интенсивность излучения лазерной накачки вблизи электродов в ~ 35 раз.

На рис. 1 приведены предлагаемая концепция лазерной накачки (a) и использованная в расчетах 2D-модель ФПА (b). В расчетах был использован фотопроводящий полубесконечный слой $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с парой золотых электродов на поверхности. Толщина Ti/Au-металлизации электродов ФПА составила 0.45 μm , ширина зазора между электродами $g = 10 \mu\text{m}$, диаметр ПСВ варьировался в пределах 140–240 μm .

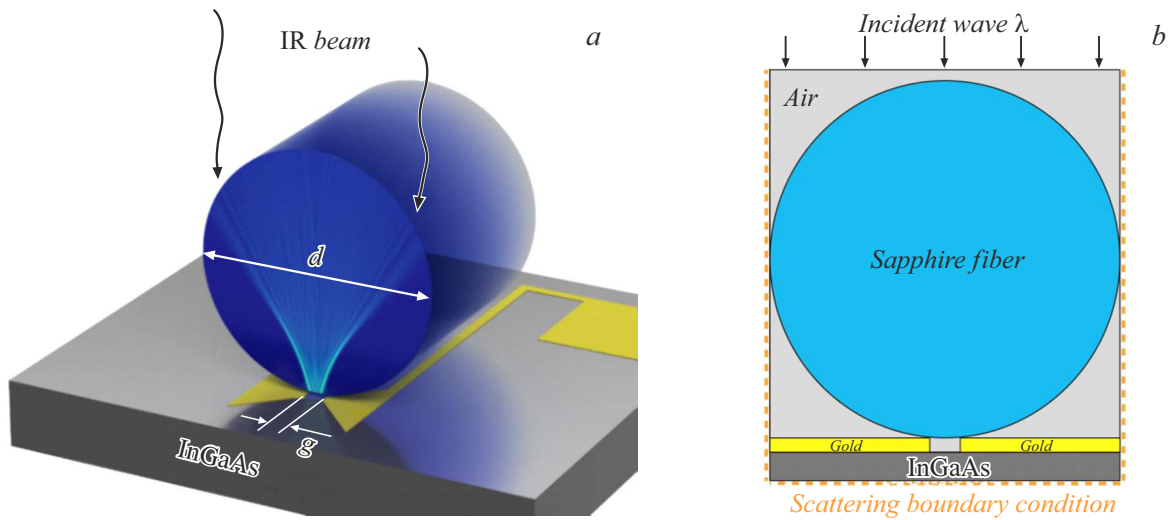


Рис. 1. Концепция накачки ФПА через расположенное на ее поверхности ПСВ (а) и схема расчетного 2D-домена (b).

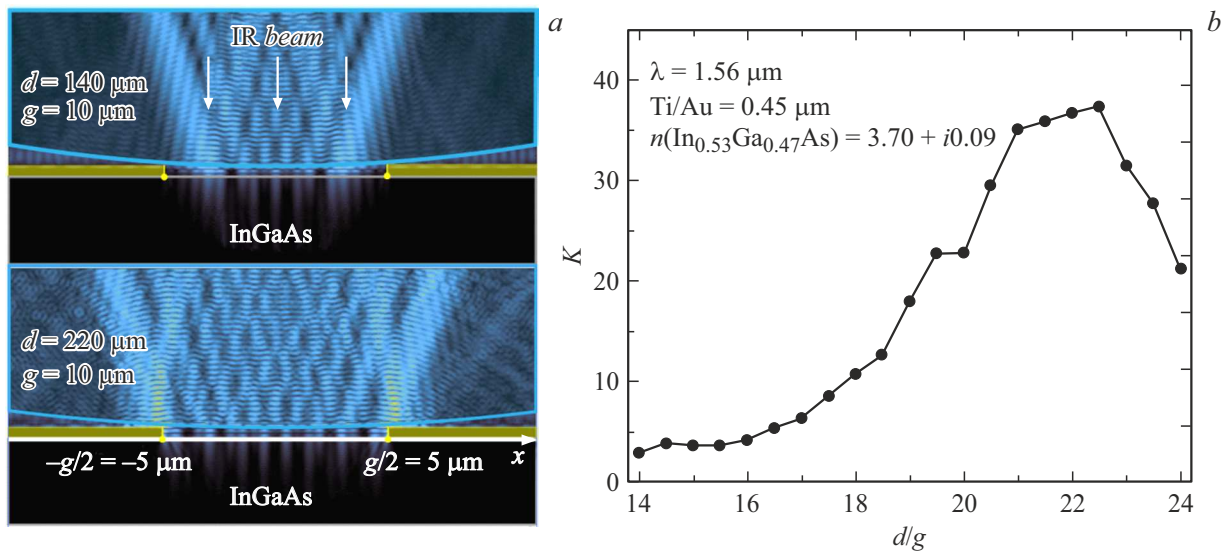


Рис. 2. Нормированная плотность мощности электрического поля накачки в сечении ПСВ и фотопроводящем слое (а) и коэффициент увеличения интенсивности накачки K (b) для различных значений параметра d/g .

Стационарный расчет перераспределения излучения накачки по поверхности ФПА проводился методом конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics для длины волны $\lambda = 1.56 \mu\text{m}$. Размеры ячеек конечно-элементной сетки варьировались от $\lambda/8$ для области зазора до $\lambda/4$ для остальных областей. Для перехода к безразмерным величинам мы ввели параметры (x/g) и (d/g) в качестве латеральной координаты и диаметра ПСВ соответственно. Результаты моделирования — пространственное распределение плотности мощности электрического поля накачки ($\sim |E|^2$) для двух характерных значений параметра $d/g = 14$ и ~ 22.5 , соответствующих минимальной и максимальной локализации излучения, — приведены на рис. 2, а.

На рис. 2, а отчетливо видно формирование субволновых каустик накачки внутри слоя InGaAs. Эффективность накачки I определяется числом фотовозбужденных носителей заряда, которые смогут достигнуть электродов ФПА до рекомбинации. Для оценки данной величины нужно проинтегрировать $|E|^2$ с экспоненциально убывающим от краев к центру зазора весовым фактором:

$$I \sim \int_{-0.5g}^{0.5g} |E(x)|^2 e^{-\left(\frac{|x-0.5g|}{l}\right)} dx, \quad K = I_s/I_0, \quad (1)$$

где $l = 0.3 \mu\text{m}$ — характерный размер области дрейфа фотовозбужденных носителей заряда в InGaAs во

внешнем поле до рекомбинации [10], K — коэффициент увеличения интенсивности накачки, а индексы s и 0 соответствуют интегралам для случая ФПА с волокном на поверхности и без него. Рассчитанная зависимость $K(d/g)$ приведена на рис. 2, *b*. Видно, что коэффициент K монотонно растет, достигая максимума $K \sim 35$ при $d/g \sim 22.5$. Это характеризует случай, когда субволновые каустики располагаются вблизи краев электродов ФПА, позволяя тем самым большему числу фотовозбужденных носителей заряда внести вклад в генерацию ТНз-излучения [11].

Таким образом, в работе предложен и теоретически реализован оригинальный подход к локализации импульса лазерной накачки вблизи электродов оптико-терагерцевого преобразователя за счет использования ПСВ, создающего высокий оптический контраст на границе волокна с фотопроводником. Показано, что при оптимальном соотношении между диаметром волокна и шириной зазора ФПА возможно сформировать области максимальной локализации энергии вблизи электродов и тем самым потенциально повысить эффективность преобразования энергии.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 19-79-10240.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.I. Romero, A. Mukherjee, A.F. Olvera, M.M. Aller, S. Preu, *Nature Commun.*, **12**, 7091 (2021). DOI: 10.1038/s41467-021-27264-x
- [2] A.E. Yachmenev, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55** (19), 193001 (2022). DOI: 10.1088/1361-6463/ac43dd
- [3] 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
- [4] P. Fosodeder, S. Hubmer, A. Ploier, R. Ramlau, S. van Frank, C. Rankl, *Opt. Express*, **29** (10), 15711 (2021). DOI: 10.1364/OE.422961
- [5] A. Singh, A. Pashkin, S. Winnerl, M. Helm, H. Schneider, *ACS Photon.*, **5** (7), 2718 (2018). DOI: 10.1021/acsp Photonics.8b00460
- [6] D.S. Ponomarev, A. Gorodetsky, A.E. Yachmenev, S.S. Pushkarev, R.A. Khabibullin, M.M. Grekhov, K.I. Zaytsev, D.I. Khusyainov, A.M. Buryakov, E.D. Mishina, *J. Appl. Phys.*, **125** (15), 151605 (2019). DOI: 10.1063/1.5079697
- [7] D.V. Lavrukhin, A.E. Yachmenev, A.Yu. Pavlov, R.A. Khabibullin, Y.G. Goncharov, I.E. Spektor, G.A. Komandin, S.O. Yurchenko, N.V. Chernomyrdin, K.I. Zaytsev, D.S. Ponomarev, *Semicond. Sci. Technol.*, **34** (3), 034005 (2019). DOI: 10.1088/1361-6641/aaff31
- [8] A.B. Горбатова, Д.И. Хусяинов, А.Э. Ячменев, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, А.М. Буряков, Е.Д. Мишина, *Письма в ЖТФ*, **46** (22), 10 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.22.50300.18442 [A.V. Gorbatoва, D.I. Khusyainov, A.E. Yachmenev, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, A.M. Buryakov, E.D. Mishina, *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 1111 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020110218].
- [9] 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, *Adv. Opt. Mater.*, **8** (18), 2000307 (2020). DOI: 10.1002/adom.202000307
- [10] C.W. Berry, M. Jarrahi, *New J. Phys.*, **14**, 105029 (2012). DOI: 10.1088/1367-2630/14/10/105029
- [11] И.А. Глинский, Н.В. Зенченко, Д.С. Пономарев, *Рос. технол. журн.*, **8** (6), 78 (2020). DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-6-78-86