

07.3

## Снижение шума фотопроводящей терагерцевой антенны-детектора на основе упругонапряженной сверхрешеточной InAlAs/InGaAs-гетероструктуры

© Д.В. Лаврухин<sup>1</sup>, Ю.Г. Гончаров<sup>2</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>1,3</sup>, К.И. Зайцев<sup>2</sup>, Д.С. Пономарев<sup>1,3</sup><sup>1</sup> Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва, Россия<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр „Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН“, Москва, Россия<sup>3</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

E-mail: ponomarev\_dmitr@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 декабря 2023 г.

В окончательной редакции 25 декабря 2023 г.

Принято к публикации 26 декабря 2023 г.

Впервые экспериментально зарегистрировано значительное снижение уровня шума в фотопроводящей антенне (ФПА-детекторе) на основе упругонапряженной сверхрешеточной гетероструктуры InAlAs/InGaAs с ультракоротким временем жизни носителей заряда за счет уменьшения диаметра фокального пятна лазерного зондирующего излучения. Рассматриваемый ФПА-детектор при увеличении мощности зондирования в 10 раз демонстрирует прирост шума менее чем в 1.5 раза, что позволяет эффективно регистрировать слабые терагерцевые сигналы. Методом спектроскопии с регистрацией формы терагерцевых импульсов для ФПА-детектора продемонстрировано отношение сигнал/шум на уровне  $\sim 65$  dB в полосе частот 0.1–4.0 THz.

**Ключевые слова:** терагерцевая частота, фотопроводящая антенна, терагерцевый детектор, сверхрешеточная гетероструктура InAlAs/InGaAs.

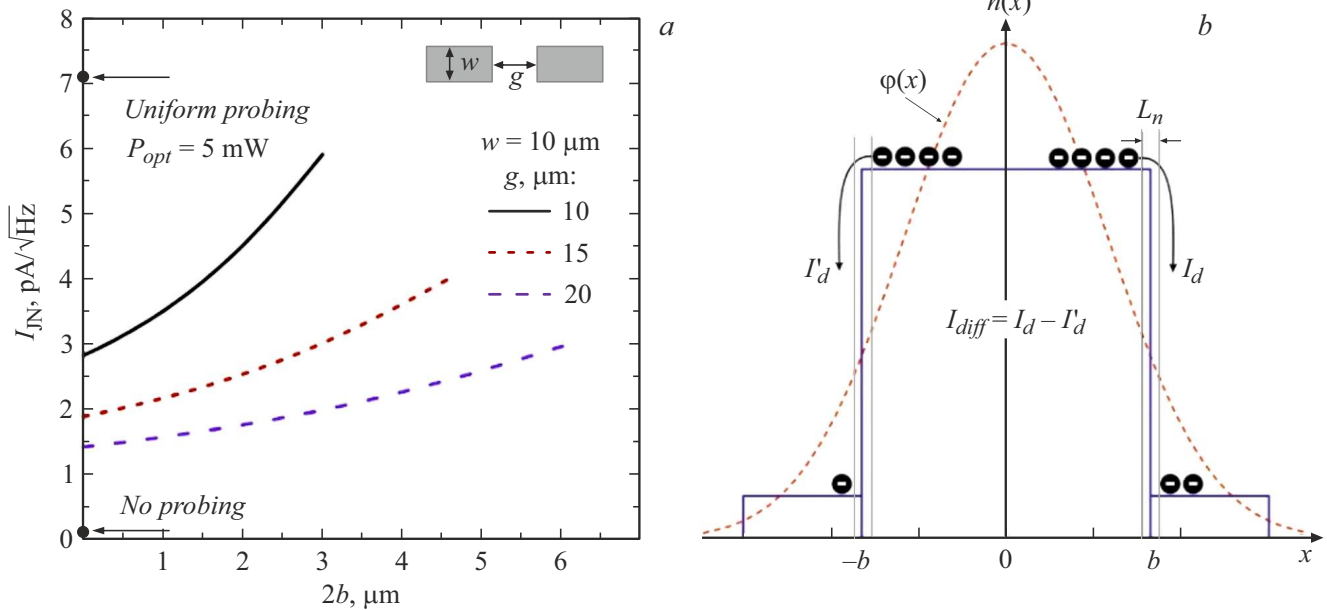
DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57513.19839

Широкополосная спектроскопия с регистрацией формы терагерцевых (THz) импульсов активно применяется для решения широкого спектра задач [1,2]. Для регистрации электромагнитных импульсов THz-диапазона в современных спектрометрах применяются фотопроводящие антенны (ФПА) благодаря их компактности, возможности достижения высокого отношения сигнал/шум, а также широкой полосе детектирования [3,4]. Перспективными полупроводниковыми материалами, способными возбуждаться излучением волоконных фемтосекундных лазеров, являются твердый раствор InGaAs, а также сверхрешеточные гетероструктуры InAlAs/InGaAs [5–7]. К сожалению, ввиду высокой собственной проводимости слои InGaAs имеют низкое электрическое сопротивление, а также большое время жизни носителей заряда ( $\tau_{rec}$ ), что увеличивает мощность теплового шума и тем самым ограничивает их использование в ФПА. Предложены различные методы оптимизации характеристик фотопроводящих материалов на основе InGaAs [8], однако задача снижения шумов ФПА-детектора по-прежнему является актуальной и требует поиска новых подходов.

В настоящей работе впервые экспериментально продемонстрировано значительное уменьшение мощности шума ФПА-детектора, разработанного на основе оригинальной упругонапряженной сверхрешеточной гетероструктуры (УНГС) InAlAs/InGaAs, при уменьшении диаметра фокального пятна ( $2b$ ) лазерного зондирова-

ния. Образцы УНГС выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Для проведения сравнительного анализа дополнительно были изготовлены образцы решеточно-согласованных гетероструктур (РСГС) InAlAs/InGaAs. Единственное отличие УНГС от РСГС состоит в уменьшении с 52 до 38% мольной доли индия в барьерных слоях InAlAs для создания упругих напряжений, что приводит к уменьшению  $\tau_{rec}$  с 4.4 до 1.7 ps [9] и делает УНГС превосходным кандидатом для создания ФПА-детектора на основе InGaAs.

Известно, что доминирующим механизмом генерации шума в ФПА-детекторах является тепловой шум ( $I_{JN}$ ) [10], мощность которого обратно пропорциональна сопротивлению детектора ( $R_{det}$ ). Традиционно основным методом снижения теплового шума является выбор высокоомного материала, что трудно осуществить в случае InGaAs. При острой фокусировке зондирующего лазерного импульса в зазор между электродами ( $g$ ) интегральное сопротивление детектора представляет собой сумму двух сопротивлений:  $R_{det} = R_{dark} + R_{ph}$  — для областей фокального пятна и оставшейся части фотопроводника в зазоре соответственно. Таким образом, возникает зависимость теплового шума от диаметра фокального пятна, которая для ФПА-детектора на основе УНГС приведена на рис. 1, а. Аналитический расчет по одномерной модели Друде показал [3], что при  $g/2b \gg 1.44$  отношение  $R_{dark}/R_{ph} \gg 1$ , границы

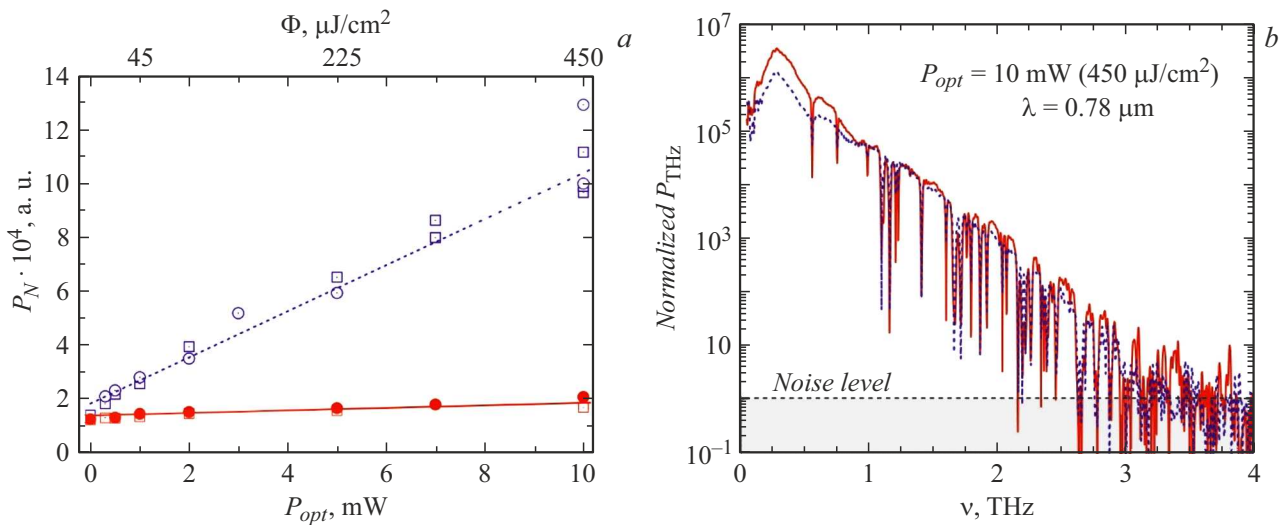


**Рис. 1.** Тепловой шум ФПА-детектора  $I_{JN}$  на основе УНГС при различном диаметре фокального пятна лазерного зондирования  $2b$  (a) и схема возникновения диффузионного тока  $I_{diff}$  (b). Параметры  $\varphi(x)$  и  $n(x)$  — пространственные профили пучка лазерного зондирования и концентрации электронов;  $\varphi(\pm b) = \varphi(0)/e^2$ .

фокального пятна определялись по спаду интенсивности в  $e^2$  раз. Этот факт, в частности, объясняет наблюдаемую на рис. 1, a при  $g = 20 \mu\text{m}$  близость шума детектора к темновому в широком диапазоне значений  $2b$ . Важно отметить, что малые значения диаметра позволяют минимизировать тепловой шум, однако из-за неизбежной асимметрии электродов или формы фокального пятна появляется ток диффузионной природы ( $I_{diff}$ ), как показано на рис. 1, b. В THz-спектрометрах обычно модулируют напряжение смещения ФПА-источника [11], поэтому  $I_{diff}$  отсекается синхронным усилителем, однако соответствующий диффузии дробовой шум ( $I_S$ ) ведет к росту зашумленности сигнала ФПА-детектора. Численные оценки для УНГС и РСГС с параметрами из работы [3] дали следующие величины:  $I_{JN} = 7.1$  и  $17.9 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,  $I_{diff}$  в стационарном состоянии составляет  $5.5$  и  $25.6 \mu\text{A}$ , при этом  $I_S \leq 1.4$  и  $2.9 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Видно, что  $I_S \sim I_{JN}$ , поэтому вкладом дробового шума нельзя пренебречь, а экспериментально измеряемая мощность шума  $P_N \propto I_{JN}^2 + I_S^2$ . При малом диаметре фокального пятна с ростом средней мощности лазерного зондирования  $P_{opt}$  шум детектора  $P_N$  будет возрастать преимущественно за счет слагаемого  $I_S^2 \propto P_{opt}$ :  $P_N \propto \text{const} + I_S^2$ , т. е. по линейному закону. Таким образом, скорость роста шума (тангенс угла наклона) оказывается пропорциональной диффузионной длине  $L_n$ . Поскольку регистрируемая детектором мощность  $P_{THz} \propto P_{opt}$ , последнее обстоятельство особенно важно с точки зрения максимизации отношения сигнал/шум при детектировании слабых THz-сигналов.

Измерения характеристик ФПА-детекторов проводились на лабораторном THz-спектрометре [3,11], в котором в качестве источника излучения использовался лазер с длиной волны  $\lambda = 780 \text{ nm}$  и длительностью импульсов  $100 \text{ fs}$ . Мощность шума ФПА-детекторов принята равной среднему квадрату сигнала при блокировке THz-излучения. Острая фокусировка зондирующего излучения с  $2b \approx 6.6 \mu\text{m}$  обеспечила в экспериментах  $R_{dark}/R_{ph} \approx 3.6$  и тем самым минимизировала тепловой шум. Приведенная на рис. 2, a зависимость шума детектора  $P_N(P_{opt})$  для РСГС хорошо описывается линейной функцией, тем самым экспериментально подтверждая факт наличия в сигнале дробового шума  $I_S$ . Отметим, что тангенс наклона прямой для УНГС оказался существенно меньше, чем для РСГС. В частности, при увеличении мощности зондирования в 10 раз ФПА-детектор на основе УНГС демонстрирует прирост шума менее чем в 1.5 раза. Поэтому данный оригинальный материал является более эффективным, что наглядно продемонстрировано нормированными THz-спектрами на рис. 2, b. В частности, УНГС может быть использована для создания ФПА-детекторов слабых THz-сигналов (на уровне долей pW). При этом отношение сигнал/шум находится на уровне  $65 \text{ dB}$  в полосе частот  $0.1 - 4.0 \text{ THz}$ .

Таким образом, в работе предложен и экспериментально апробирован оригинальный подход к снижению шума ФПА-детектора за счет использования упругонапряженной сверхрешеточной гетероструктуры InAlAs/InGaAs в сочетании с малым диаметром фокального пятна зондирующего излучения.



**Рис. 2.** *a* — мощность шума  $P_N$  для ФПА-детекторов при разной средней мощности  $P_{opt}$  и средней плотности мощности энергии  $\Phi$  лазерного зондирования. Символы различного вида соответствуют измерениям для разных типов идентичных образцов ФПА-детекторов на основе РСГС (верхняя кривая) и на основе УНГС (нижняя кривая). *b* — зарегистрированные спектры ТГц-излучения  $P_{THz}$ , нормированные на уровень шума. Сплошные линии — измерения для ФПА-детектора на основе УНГС, пунктирные — на основе РСГС.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-79-10240.

### 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] P.U. Jepsen, R.H. Jacobsen, S.R. Keiding, J. Opt. Soc. Am. B, **13** (11), 2424 (1996). DOI: 10.1364/JOSAB.13.002424
- [3] D.V. Lavrukhin, A.E. Yachmenev, Yu.G. Goncharov, K.I. Zaytsev, R.A. Khabibullin, A.M. Buryakov, E.D. Mishina, D.S. Ponomarev, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **11** (4), 417 (2021). DOI: 10.1109/TTHZ.2021.3079977
- [4] N.T. Yardimci, D. Turan, M. Jarrahi, APL Photon., **6** (8), 080802 (2021). DOI: 10.1063/5.0055332
- [5] А.В. Горбатова, Д.И. Хусяинов, А.Э. Ячменев, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, А.М. Бурякова, 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** (11), 1111 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020110218].
- [6] А.М. Буряков, Д.И. Хусяинов, Е.Д. Мишина, Р.А. Хабибуллин, А.Э. Ячменев, Д.С. Пономарев, Письма в ЖТФ, **44** (23), 146 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.23.47022.17469 [A.M. Buryakov, D.I. Khusyainov, E.D. Mishina, R.A. Khabibullin, A.E. Yachmenev, D.S. Ponomarev, Tech. Phys. Lett., **44** (12), 1115 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018120192].
- [7] R.J.B. Dietz, B. Globisch, H. Roehle, D. Stanze, T. Göbel, M. Schell, Opt. Express, **22** (16), 19411 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.019411
- [8] A.E. Yachmenev, R.A. Khabibullin, D.S. Ponomarev, J. Phys. D: Appl. Phys., **55** (19), 193001 (2022). DOI: 10.1088/1361-6463/ac43dd
- [9] 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
- [10] N. Wang, M. Jarrahi, J. Infrared Millim. Terahertz Waves, **34** (9), 519 (2013). DOI: 10.1007/s10762-013-9995-1
- [11] A. Gorodetsky, D.V. Lavrukhin, D.S. Ponomarev, S.V. Smirnov, A. Yadav, R.A. Khabibullin, E.U. Rafailov, IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **29** (5), 8500505 (2023). DOI: 10.1109/JSTQE.2023.3271830