07.3

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

© *Д.В. Лаврухин*[1], *Ю.Г. Гончаров*[2], *Р.А. Хабибуллин*[1,3], *К.И. Зайцев*[2], *Д.С. Пономарев*[1,3]

[1] Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, Москва, Россия
[2] Федеральный исследовательский центр „Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН“, Москва, Россия
[3] 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 ~ 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 (τ_{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 зондирования. 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 τ_{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, *a*. Аналитический расчет по одномерной модели Друде показал [3], что при $g/2b \gg 1.44$ отношение $R_{dark}/R_{ph} \gg 1$, границы

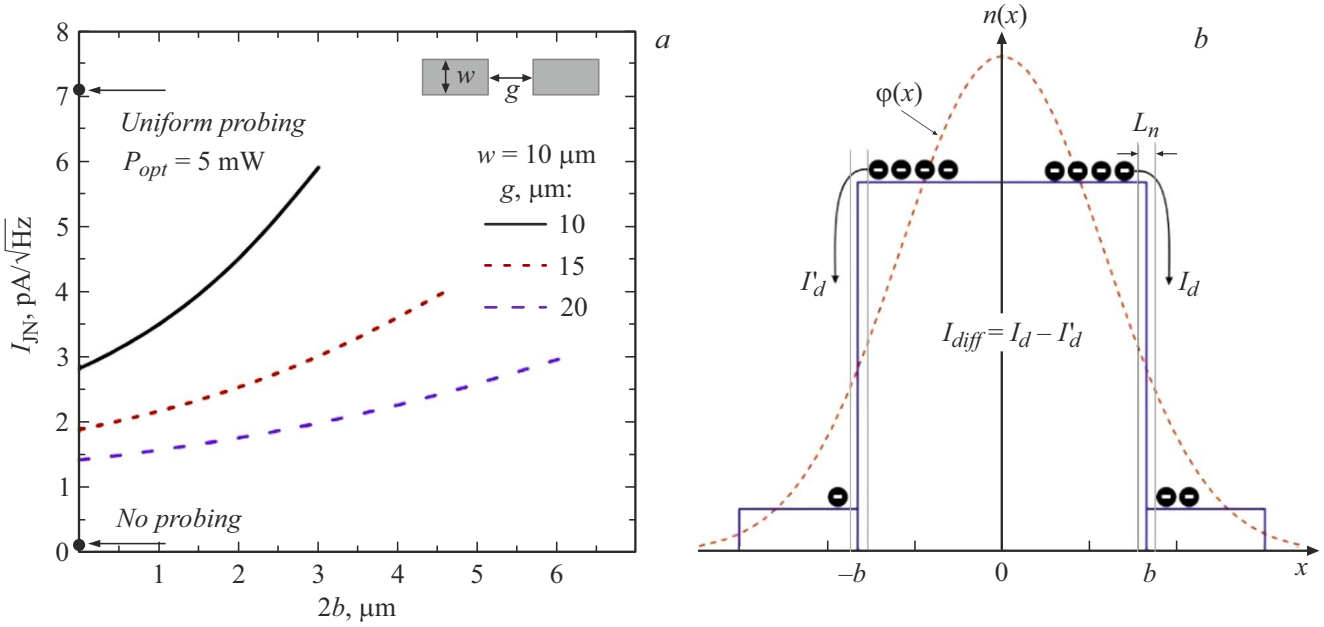

Рис. 1. Тепловой шум ФПА-детектора I_{JN} на основе УНГС при различном диаметре фокального пятна лазерного зондирования $2b$ (a) и схема возникновения диффузионного тока I_{diff} (b). Параметры $\varphi(x)$ и $n(x)$ — пространственные профили пучка лазерного зондирования и концентрации электронов; $\varphi(\pm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

фокального пятна определялись по спаду интенсивности в e^2 раз. Этот факт, в частности, объясняет наблюдаемую на рис. 1, a при $g = 20\,\mu$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: $I_{\mathrm{JN}} = 7.1$ и 17.9 pA/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$, I_{diff} в стационарном состоянии составляет 5.5 и 25.6 μA, при этом $I_S \leqslant 1.4$ и 2.9 pA/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$. Видно, что $I_S \sim I_{\mathrm{JN}}$, поэтому вкладом дробового шума нельзя пренебречь, а экспериментально измеряемая мощность шума $P_N \propto I_{\mathrm{JN}}^2 + I_S^2$. При малом диаметре фокального пятна с ростом средней мощности лазерного зондирования P_{opt} шум детектора P_N будет возрастать преимущественно за счет слагаемого $I_S^2 \propto P_{opt}$: $P_N \propto \mathrm{const} + I_S^2$, т. е. по линейному закону. Таким образом, скорость роста шума (тангенс угла наклона) оказывается пропорциональной диффузионной длине L_n. Поскольку регистрируемая детектором мощность $P_{\mathrm{THz}} \propto P_{opt}$, 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 $\lambda = 780$ nm и длительностью импульсов 100 fs. Мощность шума ФПА-детекторов принята равной среднему квадрату сигнала при блокировке THz-излучения. Острая фокусировка зондирующего излучения с $2b \approx 6.6\,\mu$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 dB в полосе частот 0.1–4.0 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.

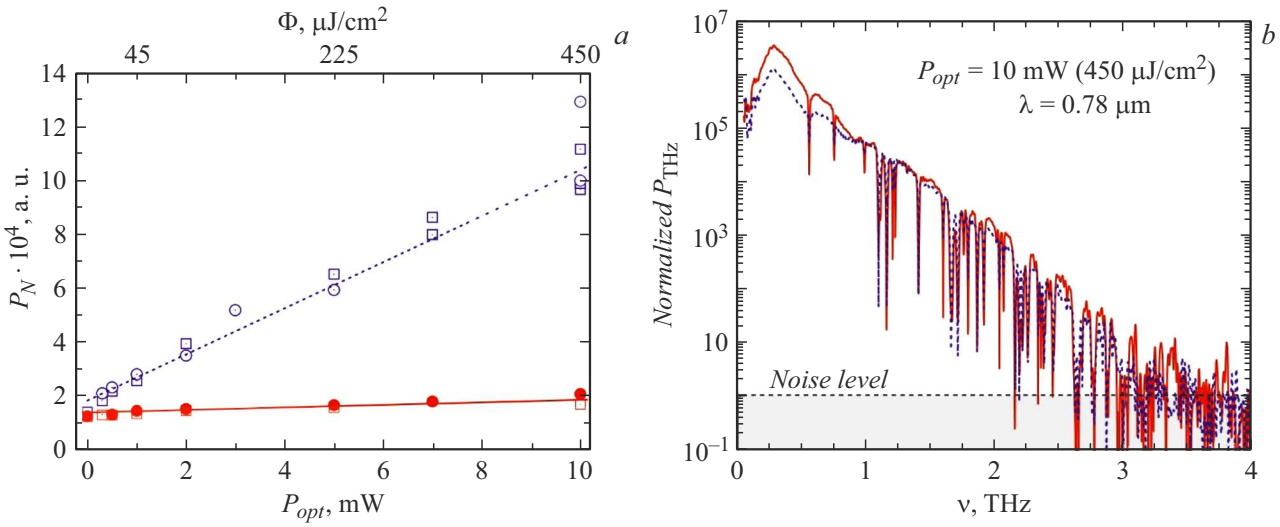

Рис. 2. *a* — мощность шума P_N для ФПА-детекторов при разной средней мощности P_{opt} и средней плотности мощности энергии Φ лазерного зондирования. Символы различного вида соответствуют измерениям для разных типов идентичных образцов ФПА-детекторов на основе РСГС (верхняя кривая) и на основе УНГС (нижняя кривая). *b* — зарегистрированные спектры THz-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 РНФ 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. Gorbatova, 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