

07.2;07.3;08.3;09.1;13.1;13.4

Быстродействующие фотодетекторы на основе квантовых ям-точек InGaAs/GaAs

© С.А. Минтаиров^{1,2}, С.А. Блохин², Н.А. Калюжный², М.В. Максимов¹, Н.А. Малеев²,
А.М. Надточий^{1,3}, Р.А. Салий², Н.В. Крыжановская³, А.Е. Жуков³

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 22 октября 2021 г.

В окончательной редакции 16 ноября 2021 г.

Принято к публикации 17 ноября 2021 г.

Исследованы быстродействующие фотодетекторы на основе наноструктур InGaAs/GaAs квантовые ямы-точки. Продемонстрирована полоса пропускания ~ 8.2 GHz по уровню -3 dB на длине волны 905 nm. Показано, что скорость внутренних процессов в исследуемых наноструктурах позволяет создавать фотодетекторы с полосой пропускания до 12.5 GHz, а процессы термического выброса носителей из слоев квантовых ям-точек не ограничивают быстродействие при обратных смещениях более 5 V.

Ключевые слова: фотодетектор, быстродействие, частотный отклик, наноструктуры.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.04.52082.19059

Квантово-размерные наноструктуры на основе материалов, рассогласованных по параметру решетки с матрицей (квантовые ямы и квантовые точки), позволяют расширить спектральный диапазон работы различных оптоэлектронных приборов за пределы, установленные шириной запрещенной зоны материала матрицы. В частности, рабочие длины волн приборов, выращенных на подложках GaAs, могут достигать до $1.3 \mu\text{m}$ при использовании в активной области наноструктур InGaAs и сохранении псевдоморфного роста [1,2]. Перспективным применением для таких наноструктур являются быстродействующие фотодетекторы (ФД), работающие в спектральном диапазоне $0.9\text{--}1.1 \mu\text{m}$, в котором снижаются коротковолновая фоточувствительность приборов на основе InGaAs/InP и длинноволновая фоточувствительность приборов на основе GaAs и Si. Ранее для резонансных ФД спектрального диапазона 970 nm на основе квантовых ям InGaAs/GaAs была продемонстрирована полоса пропускания ~ 1.3 GHz по уровню -3 dB [3]. Применение вертикально связанных массивов квантовых точек InGaAs/GaAs позволило создать резонансные ФД спектрального диапазона 1.03 [4] и $1.06 \mu\text{m}$ [5]. Сравнительно недавно были продемонстрированы $p\text{--}i\text{--}n$ -ФД на основе квантовых точек InAs/InGaAs спектрального диапазона $1.3 \mu\text{m}$ с шириной полосы пропускания ~ 1.5 [6] и ~ 5.5 GHz [7].

Нами был разработан новый тип наноструктур со смешанной размерностью — квантовые ямы-точки (КЯТ) $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ — и продемонстрирована его перспективность для светоизлучающих и фотоэлектрических приложений [8,9]. Было показано, что ФД на основе 20 рядов КЯТ обеспечивают уровень спектральной

чувствительности $0.2\text{--}0.3$ A/W в диапазоне длин волн $950\text{--}1050$ nm [10]. Исследование импульсного отклика ФД на основе КЯТ позволило установить, что характерные времена процессов термического выброса фотогенерированных носителей из КЯТ, поглощающих вплоть до 1100 nm, оказываются менее 250 ps [10].

В настоящей работе исследованы амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) $p\text{--}i\text{--}n$ -ФД на основе КЯТ, а также процессы термического выброса фотогенерированных носителей, захваченных в КЯТ.

Исследуемые структуры $p\text{--}i\text{--}n$ -ФД были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на висциальных непроводящих подложках GaAs (100). Гетероструктура ФД на основе КЯТ (рис. 1, *a*) включала тыльный контактный слой $n\text{-GaAs}$, катодный слой $n\text{-GaAs}$, слой $i\text{-GaAs}$ общей толщиной 1200 nm, анодный слой $p\text{-GaAs}$, широкозонное окно $p^+\text{-Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ и фронтальный контактный слой $p^{++}\text{-GaAs}$. В середине i -области были расположены 20 рядов КЯТ, сформированных осаждением четырех монослоев $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ (толщина ~ 1 nm), разделенных спейсерными слоями GaAs толщиной 50 nm. Из выращенных структур методом фотолитографии и сухого травления были изготовлены ФД в копланарной топологии контактных площадок (рис. 1, *b*), представляющие собой мезы диаметром $\sim 36 \mu\text{m}$, высотой $\sim 1.5 \mu\text{m}$ с диаметром светочувствительной области $\sim 28 \mu\text{m}$. Для формирования омических контактов к слоям p -типа использовался MnAg/Ni/Au-контакт, а для слоев n -типа — AuGe/Ni/Au-контакт. Пассивация поверхности травленой мезы и нанесение просветляющего покрытия не проводились. Планаризация поверхности была выполнена с приме-

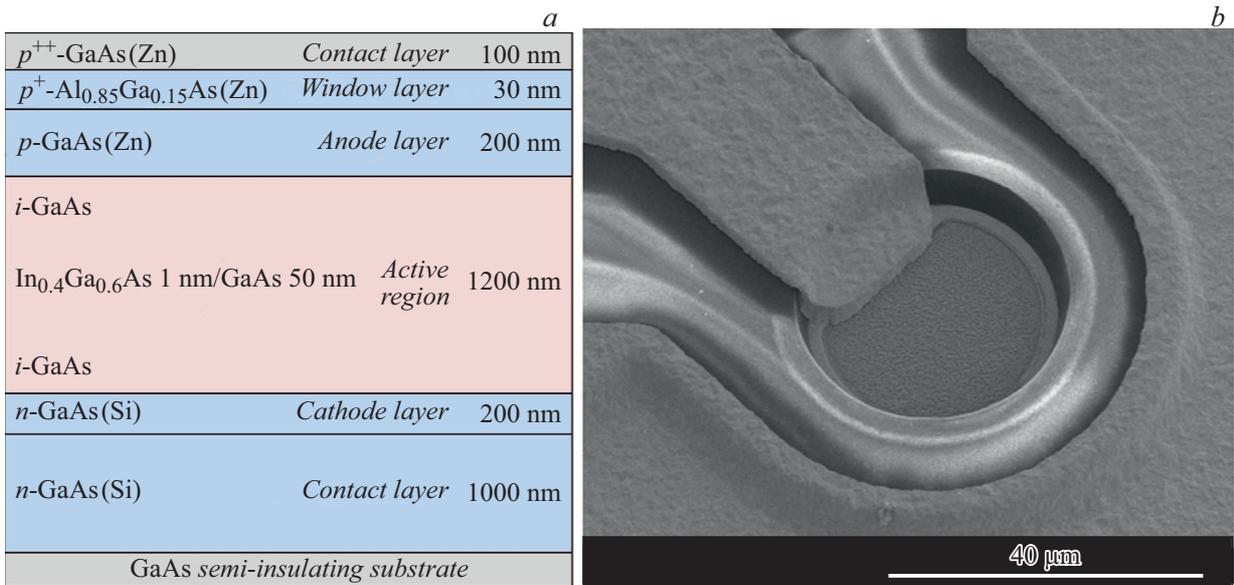


Рис. 1. Схематическое изображение структуры ФД (а) и внешний вид СВЧ-чипа (b).

нением полиимида. Измеренные значения фототоков для изготовленных фотодиодов не превышали 1 нА при обратном напряжении до -20 В, а фоточувствительность на длинах волны 860 и 905 нм составляла 0.35 и 0.1 А/Вт соответственно.

Для измерения коэффициента отражения СВЧ-сигнала (параметр S_{22}) и амплитудно-частотной характеристики ФД (параметр S_{21}) использовался СВЧ-анализатор цепей PNA N5234B. В качестве реперных источников оптического возбуждения при определении оптико-электрического частотного отклика ФД на оптический сигнал малой амплитуды использовались высокоскоростные вертикально-излучающие лазеры на основе In(Al)GaAs/GaAs спектрального диапазона 860 и 905 нм. Лазерное излучение вводилось в многомодовое оптическое волокно через гибридную интегрированную макролинзу (для увеличения числовой апертуры) и детектировалось высокоскоростным волоконно-оптическим детектором Newport 1414-50 (для определения истинного частотного отклика лазера), а затем исследуемым ФД на основе КЯТ через оптоволоконный зонд с микролинзой.

На рис. 2, а приведены зависимости малосигнального частотного отклика ФД на оптическую модуляцию на длине волны 905 нм, измеренные при различных обратных смещениях (от -1 до -9 В). Увеличение обратного смещения приводило к расширению полосы пропускания ФД (частота среза АЧХ по уровню -3 dB) от 6.4 до 8.2 GHz, которое насыщалось при обратном смещении -5 В. В общем случае быстродействие фотодетектора определяется комбинацией следующих механизмов: дрейфа носителей в обедненной области, диффузии носителей и передаточной функции RC-цепочки, образованной элементами ФД.

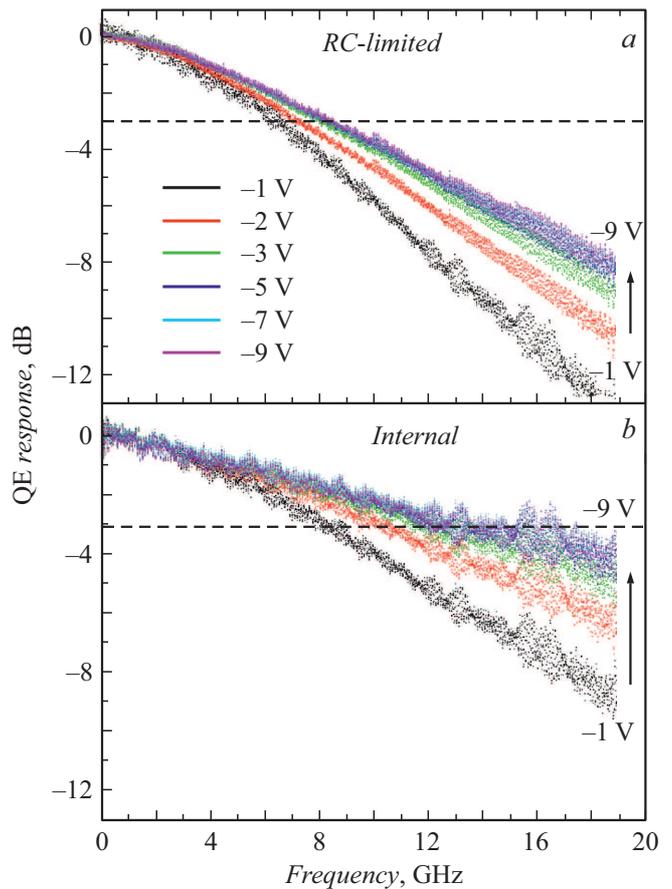


Рис. 2. Частотный отклик ФД на длине волны 905 нм при различных обратных смещениях: а — внешний, лимитированный паразитными RC-цепочками, б — внутренний, полученный вычитанием частотного отклика RC-цепочек. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

Для того чтобы оценить влияние паразитной RC -цепочки, была выполнена итерационная процедура восстановления параметров эквивалентной электрической схемы ФД на основе экспериментальных данных S_{22} . За основу была взята эквивалентная схема двух последовательно включенных низкочастотных фильтров первого порядка: первый фильтр образован емкостью и сопротивлением контактных площадок, а второй — емкостью и сопротивлением p - n -перехода ФД.

Внутренний оптико-электрический частотный отклик ФД (рис. 2, *b*) был извлечен из его экспериментальной АЧХ путем вычитания расчетной АЧХ паразитной RC -цепочки. Согласно данным рис. 2, *b*, насыщение величины полосы пропускания внутреннего оптоэлектронного частотного отклика ФД также происходит при обратном смещении -5 V. Полоса пропускания внутреннего оптоэлектронного частотного отклика ФД достигает максимального значения ~ 12.5 GHz по уровню спада -3 dB. Поскольку частота отсечки паразитной RC -цепочки, рассчитанная на основе извлеченных параметров эквивалентной схемы ФД, превышает 13.5 – 14 GHz и слабо зависит от приложенного обратного смещения (вставка на рис. 3), наблюдаемое насыщение полосы пропускания АЧХ ФД преимущественно обусловлено процессами разделения-сбора носителей. Однако при фотоэлектрическом преобразовании света в квантово-размерных объектах дополнительно необходимо учитывать процессы термического выброса фотогенерированных носителей в матрицу [11,12].

Для более детального исследования влияния этих процессов на быстродействие ФД были проведены измерения малосигнального частотного отклика исследуемых ФД на оптическую модуляцию на длине волны 860 nm. Поскольку в этом случае поглощение фотонов происходит непосредственно в матрице GaAs, процессами термического выброса можно пренебречь.

На рис. 3 представлены зависимости полосы пропускания внутреннего оптоэлектронного частотного отклика ФД от величины обратного смещения при оптико-электрическом преобразовании на длинах волн 860 и 905 nm. Из зависимостей видно, что насыщение роста полосы пропускания при оптической модуляции на длине волны 860 nm происходит при обратном смещении -4 V, что свидетельствует о насыщении роста дрейфовой скорости носителей в обедненной области. Однако предельное значение полосы пропускания снова не превышает 12.5 GHz, что, по-видимому, связано с уменьшением дрейфовой скорости и/или рассеянием носителей на периодическом потенциале КЯТ, лимитирующим время пролета носителей через i -область. Тот факт, что насыщение полосы пропускания на длине волны 905 nm наблюдается при большем смещении (-5 V), по нашему мнению, объясняется дополнительным ограничением, которое накладывают процессы термического выброса носителей из слоев КЯТ на быстродействие ФД по аналогии со случаем ФД на основе квантовых точек InAs/InGaAs [13]. Действительно, увеличение обратного

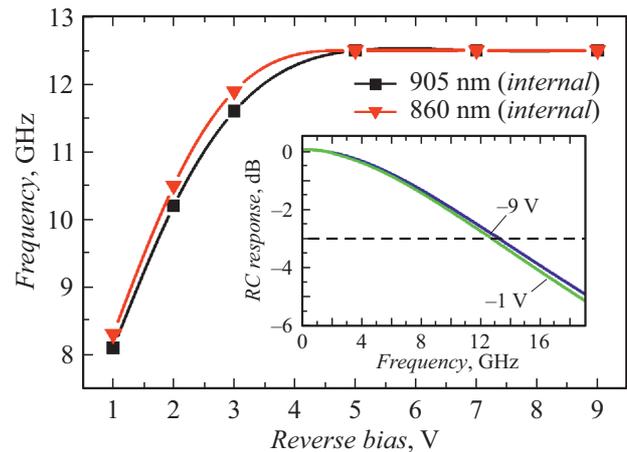


Рис. 3. Зависимости полосы пропускания внутреннего оптоэлектронного частотного отклика ФД по уровню -3 dB от приложенного обратного смещения при оптической модуляции на длинах волн 860 и 905 nm. На вставке — смоделированные АЧХ фильтров низких частот, образованных RC -цепочками.

смещения приводит к увеличению напряженности поля в области пространственного заряда, что уменьшает эффективную ширину барьера для носителей, захваченных в КЯТ, и в свою очередь увеличивает вероятность выброса носителей в матрицу. Принимая во внимание близкие значения полосы пропускания при различной длине волны оптической модуляции, можно предположить, что процессы термического выброса носителей из КЯТ и их дрейф не являются решающим механизмом, ограничивающим быстродействие ФД на основе КЯТ. Выяснение причин обнаруженного поведения требует дальнейших детальных исследований.

Таким образом, показано, что при обратных смещениях -5 V процессы термического выброса носителей из КЯТ не являются доминирующим механизмом, лимитирующим скорость разделения-сбора носителей, а характерные времена внутренних процессов в фотоактивной среде на основе КЯТ потенциально обеспечивают быстродействие на уровне 12.5 GHz. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что КЯТ являются перспективными для создания быстродействующих ФД, работающих на длинах волн вблизи 1 μ m.

Благодарности

Исследования методом растровой электронной микроскопии выполнены в ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ при ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Леденцову за предоставление образцов вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 905 nm.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 0791-2020-0002). Н.В. Крыжановская и А.Е. Жуков благодарят Программу фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Koyama, D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. Chen, A. Matsutani, T. Skaguchi, K. Iga, *Electron. Lett.*, **35**, 1079 (1999). DOI: 10.1049/el:19990756
- [2] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, S.S. Mikhlin, V.M. Ustinov, A.F. Tsatsul'nikov, M.V. Maximov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.M. Shernyakov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1926 (1999). DOI: 10.1063/1.124873
- [3] B.K. Jeong, Y.M. Song, V.V. Lysak, Y.T. Lee, *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **10**, 2547 (2008).
https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Large%20area%20InGaAs/GaAs%20resonant%20cavity%20enhanced%20photodetector%20for%20sensor%20application&author=B.%20K.%20Jeong&author=Y.%20M.%20Song&author=V.%20V.%20Lysak&author=&author=Y.%20T.%20Lee&publication_year=2008
- [4] O. Baklenov, H. Nie, K.A. Anselm, J.C. Campbell, B.G. Streetman, *Electron. Lett.*, **34**, 694 (1998). DOI: 10.1049/el:19980487
- [5] X.M. Sun, H. Zhang, H. Zhu, P. Xu, G.R. Li, J. Liu, H.Z. Zheng, *Electron. Lett.*, **45**, 329 (2009). DOI: 10.1049/el.2009.0033
- [6] Y. Wan, Z. Zhang, R. Chao, J. Norman, D. Jung, C. Shang, Q. Li, M.J. Kennedy, D. Liang, C. Zhang, J.-W. Shi, A.C. Gossard, K.M. Lau, J.E. Bowers, *Opt. Express*, **25**, 27715 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.027715
- [7] D. Inoue, Y. Wan, D. Jung, J. Norman, C. Shang, N. Nishiyama, S. Arai, A.C. Gossard, J.E. Bowers, *Appl. Phys. Lett.*, **113**, 093506 (2018). DOI: 10.1063/1.5041908
- [8] S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S. Rouvimov, A.E. Zhukov, *Nanotechnology*, **26**, 385202 (2015). DOI: 10.1088/0957-4484/26/38/385202
- [9] M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, N.Yu. Gordeev, Yu.M. Shernyakov, A.S. Payusov, F.I. Zubov, V.N. Nevedomskiy, S.S. Rouvimov, A.E. Zhukov, *Appl. Sci.*, **10**, 1038 (2020). DOI: 10.3390/app10031038
- [10] С.А. Минтаиров, И.М. Гаджиев, Н.А. Калужный, М.В. Максимов, А.М. Надточий, М.В. Нахимович, Р.А. Салий, М.З. Шварц, А.Е. Жуков, *Письма в ЖТФ*, **46** (24), 11 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.24.50420.1848 [S.A. Mintairov, I.M. Gadzhiev, N.A. Kalyuzhnyi, M.V. Maksimov, A.M. Nadtochii, M.V. Nakhimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, A.E. Zhukov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (12), 1219 (2020). DOI: 10.1134/S106378502012024X].
- [11] V.V. Nikolaev, E.A. Avrutin, *IEEE J. Quantum Electron.*, **39**, 1653 (2003). DOI: 10.1109/JQE.2003.819527
- [12] W.-H. Chang, W.Y. Chen, T.M. Hsu, N.-T. Yeh, J.-I. Chyi, *Phys. Rev. B*, **66**, 19 (2002). DOI: 10.1103/physrevb.66.195337
- [13] Y. Wan, Z. Zhang, R. Chao, J. Norman, D. Jung, C. Shang, Q. Li, M.J. Kennedy, D. Liang, C. Zhang, J.-W. Shi, A.C. Gossard, K.M. Lau, J.E. Bowers, *Opt. Express*, **25**, 27715 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.027715