

07.2

Субнаносекундные AlGaAs/GaAs-фотодетекторы с брэгговским отражателем

© В.М. Андреев, В.С. Калиновский, Г.В. Климко, Е.В. Контрош, А.В. Малевская,
П.В. Покровский, М.З. Шварц

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vmandreev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 18 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 16 мая 2024 г.
Принято к публикации 18 мая 2024 г.

Приводятся результаты разработки и исследования высокоэффективных фотодетекторов лазерного излучения на основе гетероструктуры $p-i-n$ -AlGaAs/GaAs с брэгговским отражателем, полученной методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Разработанные универсальные фотодетекторы с диаметром фоточувствительной поверхности $70\ \mu\text{m}$ обеспечили получение минимальной длительности импульса фотоответа на полувысоте амплитуды $135\ \text{ps}$ в импульсном режиме при обратном смещении $25\ \text{V}$. В фотовольтаическом режиме (без обратного смещения) получена величина КПД 60% при мощности лазерного излучения $P_{\text{las}} = 37\ \text{mW}$ на длине волны $850\ \text{nm}$.

Ключевые слова: быстродействующий фотодетектор, молекулярно-пучковая эпитаксия, AlGaAs/GaAs-гетероструктура, брэгговский отражатель, импульсное лазерное излучение.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.17.58580.19961

Фотоэлектрические преобразователи (фотодетекторы) лазерного излучения получают все большее применение в волоконно-оптических системах передачи энергии по лазерному лучу. Беспроводная передача энергии по оптоволокну позволяет осуществить гальваническую развязку передающего и приемного энергетических модулей, что обеспечивает встроенную защиту от электромагнитных помех. Перспективной является также передача энергии по открытому оптическому каналу на Земле и в космосе.

Субнаносекундные фотодетекторы (ФД) лазерного излучения являются важными элементами радиофотонных устройств, в которых осуществляется передача мощных лазерных импульсов [1–6]. Основными требованиями к таким ФД являются увеличение мощности и КПД, а также повышение быстродействия. В настоящее время фотодетекторы на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, работающие в спектральном диапазоне $800\text{--}860\ \text{nm}$, наиболее перспективны для этих целей. Максимальное теоретическое значение КПД ФД с фотоактивной GaAs-областью составляет порядка 80% при плотности мощности лазерного излучения $P_{\text{las}} = 10\ \text{W/cm}^2$ [7] и более 85% при $P_{\text{las}} > 100\ \text{W/cm}^2$ [8]. Максимальные достигнутые значения КПД при непрерывном лазерном излучении составляют 68.9% при $P_{\text{las}} = 11\ \text{W/cm}^2$ [9], 62% при $P_{\text{las}} = 100\ \text{W/cm}^2$ [10] и 54% при $P_{\text{las}} = 1400\ \text{W/cm}^2$ [11].

В настоящей работе высокая спектральная чувствительность в диапазоне длин волн $\lambda \cong 840 \pm 20\ \text{nm}$ была получена при относительно малых толщинах поглощающих слоев благодаря встраиванию в гетероструктуру брэгговского отражателя (БО), приблизительно в 2 раза уменьшающего толщину фотоактивной части структуры.

Структура фотодетектора была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Semiteq (Россия) на подложке n -GaAs с концентрацией легирующей примеси $N_D = 3 \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$. Технологическая схема структуры представлена на рис. 1, а.

Структура содержит комбинацию слоев разных составов AlGaAs, соответственно выбирались эпитаксиальные режимы под каждый слой с учетом использования в качестве легирующих элементов Si и Be. Помимо общепризнанных режимов эпитаксии высококачественных слоев базы n -GaAs и градиентного эмиттера p -GaAs:Be при температуре роста, повышенной до 590°C , необходимо отметить несколько подходов в иных элементах структуры.

Эпитаксия 12 пар слоев БО $\{n^+-\text{AlAs}/n^+-\text{GaAs}\}$ с базовыми толщинами 69.2 и $56.1\ \text{nm}$ соответствовала происходила без вращения подложкодержателя. Понижение температуры эпитаксии до 500°C и снижение потока мышьяка до минимального соотношения потоков элементов пятой и третьей группы As/Ga(Al) в 3 раза обеспечивают стехиометрический состав и планарность роста слоев и гетерограниц AlAs и GaAs, что улучшает характеристики БО.

База n -GaAs, градиентный слой p -GaAs:Be и слой $p^+-\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$:Be создавались при двукратно увеличенной скорости эпитаксии (до $1.2\ \mu\text{m/h}$) с пропорциональным увеличением потока примеси, что позволяет сократить время роста и уменьшить вероятность внедрения сторонней примеси. Градиентный слой $p^0-p^+-\text{GaAs}$ ($1 \cdot 10^{16}\text{--}2 \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$) по составу Be создавался за счет линейного увеличения температуры источника молекулярного пучка Be. Для уменьшения диффузии примеси Be из сильно легированных приконтактных

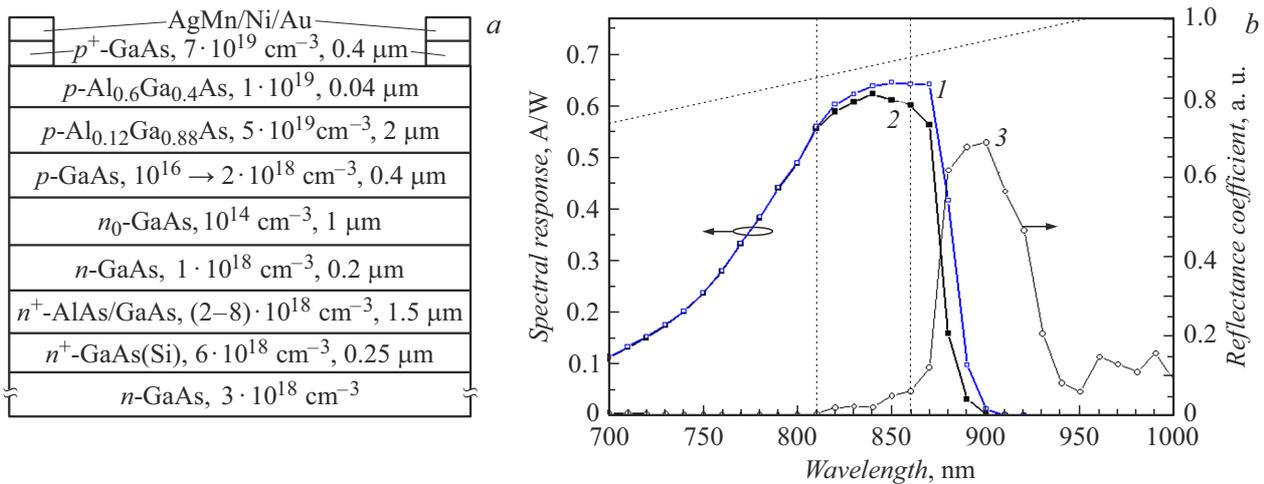


Рис. 1. *a* — схема структуры фотодетектора; *b* — спектры внутренней (1) и внешней (2) фоточувствительности и коэффициента отражения (3) фотодетектора.

слоев $p^+-Al_{0.6}Ga_{0.4}As:Be$ и $p^{++}-GaAs:Be$ температура эпитаксии была снижена до $450^\circ C$.

Постростовые операции [10] включали изготовление сплошного омического контакта к тыльной стороне подложки; изготовление фронтального кольцевого контакта с диаметрами фоточувствительной поверхности 70, 250 и 500 μm ; удаление части контактного слоя $p-GaAs$ в местах, свободных от контактов; нанесение антиотражающего покрытия.

В изготовленной структуре ФД обеспечено снижение оптических, рекомбинационных и омических потерь. Рекомбинационные потери в $p-GaAs$ -эмиттере были уменьшены благодаря уменьшению его толщины до 0.4 μm и созданию „тянущего“ электрического поля за счет градиента концентрации легирующей примеси. В области объемного заряда $p-i-n$ -перехода выращен i -слой из нелегированного $n-GaAs$ ($n_0 \geq 10^{14} cm^{-3}$) толщиной 1 μm , что обеспечивает существенное снижение емкости перехода. Снижение рекомбинационных потерь в базовом слое $n-GaAs$ ($N_D = 1 \cdot 10^{18} cm^{-3}$) обеспечивается его толщиной 0.2 μm и наличием в структуре БО.

Снижение омических потерь на сопротивлении растекания обеспечивается низким удельным сопротивлением сильно легированного ($p = 5 \cdot 10^{19} cm^{-3}$) фронтального слоя $p-Al_{0.12}Ga_{0.88}As$. Снижение фронтальных омических „контактных“ потерь обеспечивается увеличением уровня легирования подконтактного слоя $p-GaAs$ до $N_A = 7 \cdot 10^{19} cm^{-3}$ и созданием многослойных контактов AgMn/Ni/Au, обеспечивающих снижение удельного сопротивления p -контакта до $5 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot cm^2$.

Исследование спектральной фоточувствительности изготовленных фотодетекторов (рис. 1, *b*) осуществлялось на тестовых образцах размером $2.28 \times 2.28 mm$. Максимальное значение внешней спектральной фоточувствительности $SR_{ext} = 0.619 A/W$ при $\lambda = 840 nm$ (кривая 2 на рис. 1, *b*). Величина коэффициента отражения поверхности фотодетектора с антиотражаю-

щим покрытием TiO_2/SiO_2 составляет 2.3% на длине волны 840 nm. Увеличение коэффициента отражения до $K_{refl} > 60\%$ при $\lambda \cong 900 nm$ связано с процессами отражения и интерференции лазерного излучения от слоев БО (кривая 3 на рис. 1, *b*).

Исследование параметров (напряжения холостого хода V_{oc} , фактора заполнения FF , КПД) фотодетекторов осуществлялось при облучении лазерными импульсами с длиной волны излучения 850 nm с длительностью импульсов 300 ns при частоте 1 kHz. Мощность лазерного излучения, вводимая в фотодетектор, определялась исходя из спектральной ампер-ваттной характеристики $SR = 0.604 A/W$ при длине волны излучения $\lambda = 850 nm$.

На рис. 2 приведены зависимости параметров фотодетектора с диаметром фоточувствительной поверхности 70 μm , работающего в фотовольтаическом режиме (без обратного смещения), от мощности лазерного излучения. Максимальное значение КПД 60% (кривая 3 на рис. 2, *b*) достигается при мощности лазерного излучения $P_{las} = 37 mW$. При этом фактор заполнения нагрузочной характеристики составляет $FF = 80\%$ (кривая 1 на рис. 2, *b*), а напряжение холостого хода $V_{oc} = 1.24 V$ (рис. 2, *a*).

Длина волны 850 nm не является оптимальной для исследуемой структуры. Пик спектральной фоточувствительности достигается на длине волны $\lambda = 840 nm$ и составляет $SR = 0.619 A/W$. При этом расчетное максимальное значение КПД достигает 61.4% (кривая 2 на рис. 2, *b*).

Исследование быстродействия разработанных фотодетекторов проводилось для образцов с диаметром фоточувствительной поверхности 70, 250 и 500 μm при облучении лазерными импульсами длительностью 10 ps на длине волны 780 nm. В отличие от описанных выше исследований КПД фотодетекторов, выполненных при работе ФД в фотовольтаическом режиме (без внешнего смещения), исследования быстродействия ФД проводи-

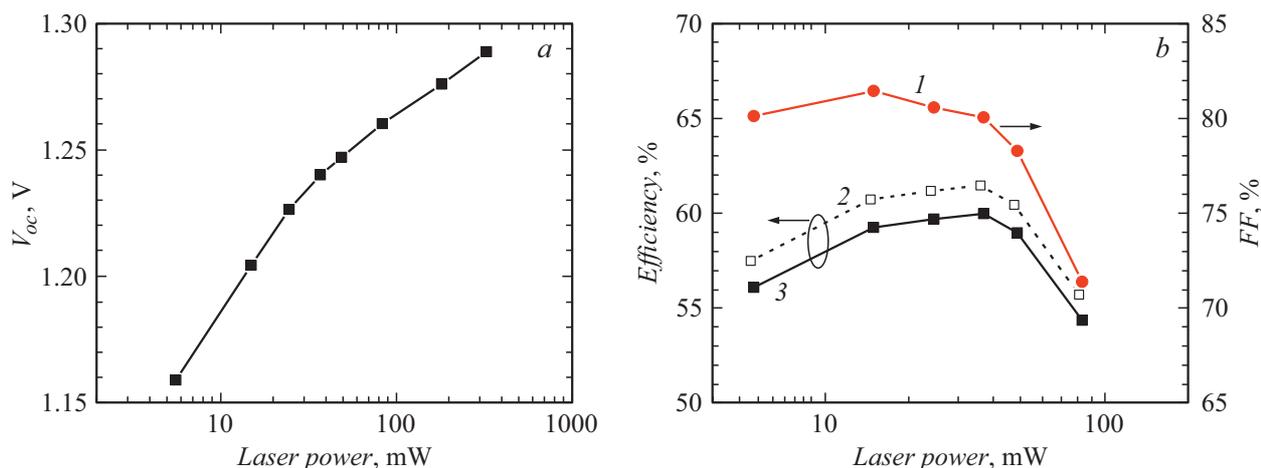


Рис. 2. Зависимости параметров фотодетектора от мощности лазерного излучения ($\lambda = 850$ nm). *a* — напряжение холостого хода V_{oc} ; *b* — фактор заполнения FF нагрузочной вольт-амперной характеристики (1), КПД на длине волны $\lambda = 840$ (2) и 850 nm (3).

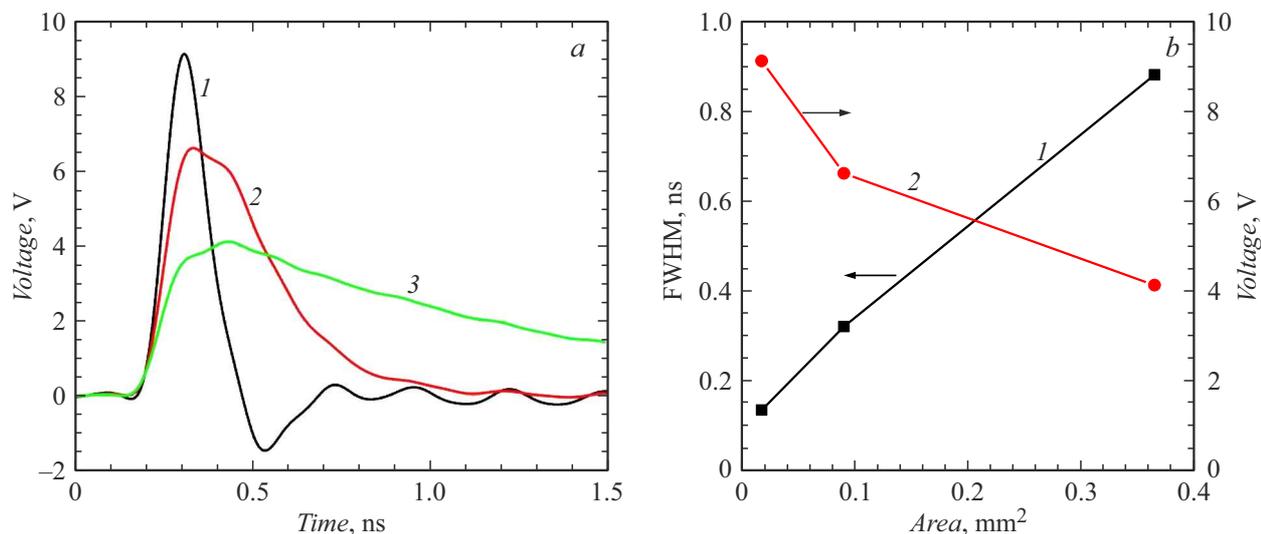


Рис. 3. *a* — формы импульсов фотоответа разработанных фотодетекторов с диаметром фоточувствительной поверхности, равным 70 (1), 250 (2) и 500 μm (3), при обратном смещении 25 V. *b* — зависимости полуширины (1) и пикового напряжения (2) импульсов фотоответа от площади p - n -перехода фотодетекторов.

лись при напряжении обратного смещения 25 V, что обеспечило согласование внутреннего сопротивления ФД с сопротивлением нагрузки измерительной цепи. Измерительная цепь включает последовательно коммутируемые фотодетектор, сопротивление нагрузки (50 Ω) и источник обратного смещения. Импульсное напряжение, генерируемое на нагрузке, регистрировалось осциллографом с полосой пропускания 7 GHz с входным сопротивлением 50 Ω . Таким образом, суммарное сопротивление нагрузки составило 25 Ω .

Фотодиодный режим работы с внешним обратным смещением кроме согласования с нагрузкой обеспечивает увеличение мощности ФД пропорционально увеличению напряжения, генерируемого на нагрузке при подаче импульсного лазерного излучения. Увеличение обратно-

го смещения приводит к увеличению толщины области объемного заряда, снижению емкости фотодетектора и, как следствие этого, к улучшению быстродействия ФД.

На основе исследований вольт-емкостных характеристик ФД с диаметром фоточувствительной поверхности 70 μm было установлено, что емкость уменьшается с увеличением отрицательного смещения в диапазоне 0–20 V: от 3.6 pF при отсутствии внешнего смещения до 3 pF при обратном смещении 20 V.

На рис. 3, *a* приведены формы выходных импульсов напряжения на нагрузке фотодетекторов с различным диаметром фоточувствительной поверхности, а на рис. 3, *b* — зависимости пикового напряжения и длительности на полувысоте амплитуды электрических импульсов для разной площади фотодетекторов. Мини-

мальная длительность импульса фотоответа $\tau_{0.5} = 135$ ps и выходное пиковое напряжение $V_{\max} = 9.1$ V были получены на нагрузке, включенной в цепи фотодетектора с диаметром фоточувствительной поверхности $70 \mu\text{m}$ с обратным смещением 25 V.

В фотодетекторах большей площади наблюдается увеличение длительности импульса фотоответа и снижение пикового напряжения. Так, для фотодетекторов с диаметрами фоточувствительной поверхности 250 и $500 \mu\text{m}$ длительности импульса составили 320 ps при выходном пиковом напряжении 6.6 V и 885 ps при пиковом напряжении 4.1 V соответственно. Уширение длительности импульсов фотоответа и снижение пиковых напряжений связаны прежде всего с увеличением емкости фотодетекторов при увеличении их площади.

Таким образом, разработаны высокоэффективные фотодетекторы лазерного излучения с диаметром фоточувствительной поверхности $70 \mu\text{m}$, работающие как в фотовольтаическом режиме (без обратного смещения) с КПД = 60% на длине волны излучения $\lambda = 850$ nm, так и в фотодиодном режиме с минимальной длительностью импульса напряжения на полувысоте амплитуды $\tau_{0.5} = 135$ ps при обратном смещении 25 V. Высокие значения спектральной фоточувствительности $SR = 0.619$ A/W на длине волны 840 nm и $SR = 0.604$ A/W на длине волны 850 nm достигнуты в основном за счет оптимизации параметров поглощающих слоев и создания тыльного БО.

Разработанные фотодетекторы могут найти широкое применение в радиофотонных устройствах и других информационно-энергетических системах одновременной беспроводной передачи энергии и информации по оптическому каналу.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Wake, A. Nkansah, N.J. Gomes, C. Leithien, C. Sion, J.-P. Vilcot, *J. Lightwave Technol.*, **26** (15), 2484 (2008). DOI: 10.1109/JLT.2008.927171
- [2] C.G. Guan, W. Liu, Q. Gao, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **75**, 136 (2018). DOI: 10.1016/j.mssp.2017.11.027
- [3] R. Kimovec, H. Helmers, A.W. Bett, M. Topič, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **27** (3), 199 (2019). DOI: 10.1002/pip.3075
- [4] E. Lopez, O. Höhn, M. Schauerte, D. Lackner, M. Schachtner, S.K. Reichmuth, H. Helmers, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **29** (4), 461 (2021). DOI: 10.1002/pip.3391
- [5] M.N. Beattie, H. Helmers, G.P. Forcade, C.E. Valdivia, O. Höhn, K. Hinzer, *IEEE J. Photovolt.*, **13** (1), 113 (2023). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2022.3218938
- [6] В.С. Калиновский, Е.И. Теруков, Ю.В. Ащеулов, Е.В. Контрош, В.С. Юфев, К.К. Прудченко, А.В. Чекалин, Е.Е. Терукова, И.А. Толкачев, С.Е. Гончаров, В.М. Устинов, *Письма в ЖТФ*, **49** (2), 21 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.02.54281.19306 [V.S. Kalinovskii, E.I. Terukov, Yu.V. Ascheulov, E.V. Kontrosh, V.S. Yuferev, K.K. Prudchenko, A.V. Chekalin, E.E. Terukova, I.A. Tolkachev, S.E. Goncharov, V.M. Ustinov, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (1), 62 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.01.55352.19306].
- [7] V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rumyantsev, *Photovoltaic conversion of concentrated sunlight* (John Wiley & Sons, Ltd., 1997).
- [8] E. Oliva, E. Dimroth, A.W. Bett, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **16** (4), 289 (2008). DOI: 10.1002/pip.811
- [9] H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, A.W. Bett, *Phys. Status Solidi (RRL)*, **15** (7), 2100113 (2021). DOI: 10.1002/pssr.202100113
- [10] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **262**, 112551 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112551
- [11] А.Н. Паньчак, П.В. Покровский, Д.А. Малевский, В.Р. Ларионов, М.З. Шварц, *Письма в ЖТФ*, **45** (2), 26 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.02.47218.17491 [A.N. Panchak, P.V. Pokrovskiy, D.A. Malevskiy, V.R. Larionov, M.Z. Shvarts, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (1), 24 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019010310].