

Исследование $p-i-n$ -фотодетектора с поглощающей средой на основе InGaAs/GaAs квантовых яма-точек

© Н.В. Крыжановская¹, С.А. Блохин^{2,1}, И.С. Махов¹, Э.И. Моисеев¹, А.М. Надточий¹,
Н.А. Фоминых¹, С.А. Минтаиров², Н.А. Калюжный², Ю.А. Гусева², М.М. Кулагина²,
Ф.И. Зубов^{3,1}, Е.С. Колодезный⁴, М.В. Максимов^{3,1}, А.Е. Жуков¹

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
190008 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Академический университет,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: nataliakryzh@gmail.com

Поступила в Редакцию 21 марта 2023 г.

В окончательной редакции 23 марта 2023 г.

Принята к публикации 20 апреля 2023 г.

Исследованы статические и динамические характеристики волноводных фотодетекторов с поглощающей областью на основе InGaAs/GaAs квантовых яма-точек при комнатной температуре. Спектральная полоса поглощения InGaAs/GaAs квантовых яма-точек лежит в диапазоне от 900 до 1100 нм. Фотодетекторы полосковой формы имеют ширину 50 мкм и длину поглощающей области от 92 до 400 мкм. Получено низкое значение плотности темнового тока (1.1 и 22 мкА/см² при –1 и –20 В соответственно) и предельное быстродействие 5.6 ГГц, ограниченное постоянной времени паразитной эквивалентной электрической RC-цепочки.

Ключевые слова: волноводный фотодетектор, частота модуляции, квантовые яма-точки, интегральная фотоника.

DOI: 10.21883/FTR.2023.03.55634.4727

1. Введение

Волноводные фотодетекторы (англ. waveguide photodiode, WGPD) являются перспективными компонентами оптических интегральных схем, в которых требуется детектирование света в плоскости интегральной схемы (т.е. торцевой ввод излучения). Конструкция волноводного фотодетектора на основе волноводной $p-i-n$ -структуры [1], где поток фотонов и движение фотогенерированных носителей ортогональны, широко используется для обеспечения высокой чувствительности и быстродействия. В таких волноводных фотодетекторах путь поглощения излучения представляет собой длину полоска и поэтому может быть существенно увеличен по сравнению с планарными фотодетекторами, в то время как путь прохождения фотогенерируемого носителя заряда соответствует толщине полупроводникового слоя волновода. К настоящему времени в волноводных $p-i-n$ -фотодетекторах на основе германия и материалов A^{III}B^V была продемонстрирована оптическая полоса пропускания > 50 ГГц [2–4]. Недостатком волноводного фотодетектора является низкая устойчивость к боковому и вертикальному смещению входного сигнала, падающего на принимающую поверхность фотодетектора. В устройствах интегральной фотоники должно быть

реализовано взаимное выравнивание источника света на основе материалов A^{III}B^V и волноводного фотодетектора на одной подложке при монокристаллической интеграции [5] или при их совмещении в результате процессов гибридной интеграции [6]. Еще одна проблема фотодетекторов состоит в том, чтобы минимизировать паразитную постоянную времени эквивалентной электрической RC-цепочки для получения высокого быстродействия фотодетекторов, что обычно реализуется за счет уменьшения активной площади, емкости контактных площадок и последовательного сопротивления. С другой стороны, низкая выходная мощность миниатюрных источников излучения требует большого пути поглощения в фотодетекторе [7], т.е. активной площади, что приводит к увеличению постоянной времени.

В данной работе для реализации эффективного поглощения света в фотодетекторе использован массив квантовых яма-точек (КЯТ) InGaAs/GaAs. Благодаря высокой плотности массива КЯТ InGaAs/GaAs в них реализуется высокое значение насыщенного материального усиления одного слоя КЯТ $1.5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ [8]. Насыщенное модовое поглощение при латеральном распространении света было оценено равным 69 см^{-1} на один слой КЯТ [9]. В работе [10] была показана возможность эффективного детектирования с помощью волноводных

фотодетекторов на основе InGaAs/GaAs КЯТ излучения дисковых микролазеров с латеральным выводом света, работающих в непрерывном режиме. В данной работе выполнено исследование спектров фототока в широком диапазоне длин волн, а также высокочастотного отклика фотодетекторов, реализованных в виде полоска шириной 50 мкм и различной длиной при засветке с помощью внешнего быстродействующего вертикально-излучающего лазера (ВИЛ) с длиной волны излучения 905 нм.

2. Описание эксперимента

Эпитаксиальная гетероструктура выращивалась методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений при пониженном давлении и температурах 500–700°C с использованием водорода в качестве газаносителя. Структура состоит из слоев $\text{Al}_{0.39}\text{Ga}_{0.61}\text{As}$, легированных примесями p - и n -типа и нелегированного волноводного слоя GaAs толщиной 0.78 мкм. Поглощающая область размещена в GaAs-волноводе и содержит 6 слоев InGaAs/GaAs КЯТ. Каждый слой КЯТ был сформирован осаждением 8 монослоев $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ и разделен с соседним слоем спейсером GaAs толщиной 40 нм (рис. 1).

Для формирования выраженных неоднородностей толщины и состава в слоях InGaAs/GaAs КЯТ были использованы разориентированные подложки GaAs [11]. Полосковые структуры шириной 50 мкм были изготовлены методами фотолитографии и сухого травления (STE ICPe68). Высота мезы составляла ~ 5.5 мкм. Для создания омического контакта к контактному слою p^+ -GaAs на поверхности полоска формировался составной контакт AgMn/Ni/Au общей толщиной 0.1–0.15 мкм.

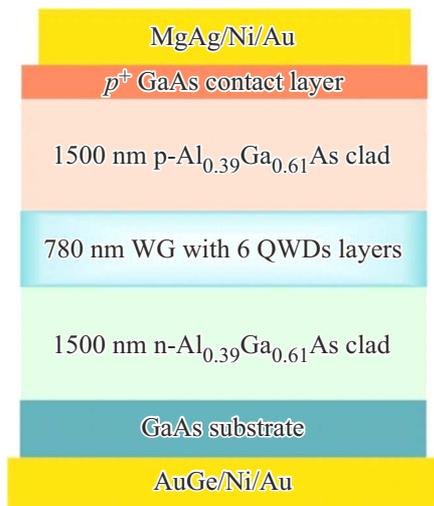


Рис. 1. Схематическое изображение последовательности слоев эпитаксиальной гетероструктуры фотодетектора с InGaAs/GaAs квантовыми яма-точками.

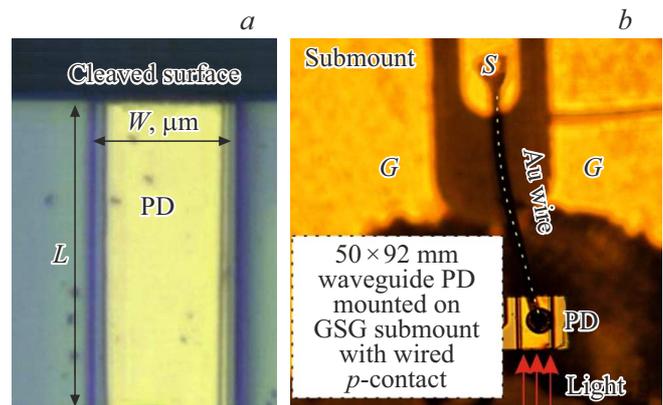


Рис. 2. Изображение, полученное с помощью оптического микроскопа ФД 50 × 182 мкм, вид сверху (a) и ФД 50 × 92 мкм, размещенного на GSG-плате (b).

Металлизация AuGe/Ni/Au использовалась для формирования сплошного омического контакта с подложкой n -GaAs. Светопоглощающие грани фотодиодных структур были сформированы с помощью колки кристаллов фотодетектора без нанесения дополнительных просветляющих покрытий. Была сформирована серия кристаллов фотодетекторов различной длины 92, 217, 322 и 400 мкм (рис. 2, a).

Исследования фототока фотодетекторов с КЯТ были выполнены при освещении торцевой поверхности фотодетектора излучением с выделенной длиной волны в спектральном диапазоне 800–1200 нм. Для этой цели использовалось излучение галогеновой лампы, пропущенное через монохроматор Spectral Products D480. Источник-измеритель Keithley 2401 использовался для измерения фототока. Для анализа частотного отклика каждый фотодетектор монтировался с помощью пайки n -контактом вниз на область G (ground) площадки керамической платы с металлизацией контактных площадок в высокочастотной топологии GSG (рис. 2, b). При этом p -контакт фотодетектора был электрически соединен с помощью золотой проволоочки с S (signal) площадкой платы.

Векторный анализатор цепей PNA N5234B использовался для измерения электрического отражения (параметры S11, S22) и отклика при малосигнальной модуляции падающего света (параметр S21). Частотный отклик фотодетекторов (ФД) измерялся на конкретной длине волны. В качестве источника модулированного излучения использовался In(Al)GaAs/GaAs вертикально-излучающий лазер (ВИЛ) с длиной волны излучения 905 нм. Следует отметить, что регистрируемый отклик фотодетектора был связан исключительно с поглощением света в InGaAs/GaAs КЯТ, тогда как матрица GaAs оставалась прозрачной для данной длины волны лазера. Излучение ВИЛ, работающего в режиме высокочастотной модуляции тока накачки, собиралось с помощью линзированного волокна и передавалось по

многомодовому оптическому волокну. С другого конца это волокно было подключено к оптоволоконному зонду с микролинзой, который фокусировал излучение ВИЛ на торцевой поверхности фотодетектора. Полученная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) исследуемого фотодетектора затем корректировалась с учетом АЧХ ВИЛ, определенной с помощью быстродействующего ИК фотодетектора Newport 1414-50.

3. Результаты и обсуждение

Вначале были исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) прямоугольного фотодетектора 50×92 мкм без освещения. Измеряемый темновой ток фотодиодов при обратном смещении -1 В составил 0.05 нА (рис. 3), что соответствует плотности темнового тока 1.1 мкА/см². Ранее для фотодетектора на основе КЯТ мы сообщали о плотности темнового тока 20 мкА/см² при обратном напряжении 1 В [12]. Для сравнения, для фотодетекторов на основе InAs/InGaAs квантовых точек для такого же обратного смещения сообщались значения плотности темнового тока 80 [7], 40 [13], 0.4 мкА/см² [14]. Низкий темновой ток (1 нА, 22 мкА/см²) сохраняется при увеличении обратного смещения по крайней мере вплоть до -20 В, что говорит о высоком структурном совершенстве эпитаксиальных слоев гетероструктуры фотодетектора и низком уровне поверхностных утечек.

Полоса спектрального отклика ФД, соответствующая поглощению в InGaAs/GaAs КЯТ, охватывает область от 900 до 1130 нм (рис. 4). При длине волны падающего излучения < 890 нм наблюдается резкое увеличение фототока, что связано с поглощением в GaAs-волноводе. Увеличение длины фотодетектора L (длины поглощающей области) от 92 до ~ 200 мкм приводит к заметному увеличению величины фототока детектора (см. вставку к рис. 4). При дальнейшем увеличении длины фотодиода

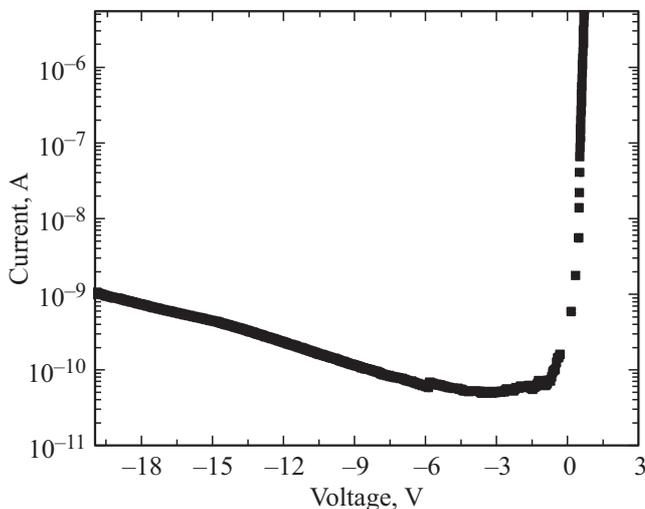


Рис. 3. ВАХ фотодетектора 50×92 мкм.

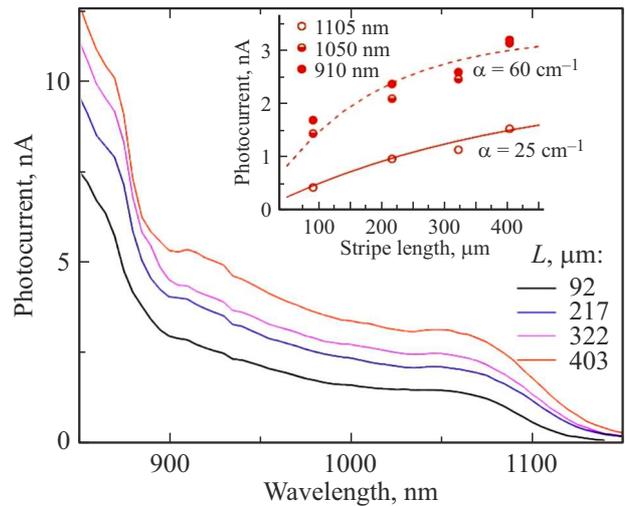


Рис. 4. Зависимость фототока от длины волны света, падающего на 50 -мкм грань фотодетектора для устройств разной длины. На вставке — зависимость фототока от длины полоска (L) для различных регистрируемых длин волн (910 , 1050 и 1105 нм).

до 400 мкм прирост фототока становится меньше, что свидетельствует о насыщении поглощения, поскольку длина фотопоглощающей области становится сравнима с характерной длиной проникновения света ($\sim 1/\alpha$). Подгонка данных с помощью функции $1 - \exp(-\alpha L)$ позволила оценить величину модового поглощения $\alpha \sim 25$ см⁻¹ для длинноволновой (длина волны 1105 нм) и ~ 60 см⁻¹ (длины волны 910 и 1050 нм) для основной спектральной области поглощения квантовых яма-точек.

Для всех фотодетекторов были получены кривые S21, характеризующие частотный отклик фотоприемников, в диапазоне напряжений обратного смещения от 0 до -20 В. На рис. 5 приведены кривые S21 для фотодетектора длиной 92 мкм. Полоса пропускания f_{3dB} определялась по уровню интенсивности сигнала — 3 дБ. Как можно видеть, увеличение величины обратного смещения, приложенного к фотоприемнику, с 0 до -10 В приводит к увеличению его полосы пропускания с 0.8 до 5.1 ГГц.

Зависимости полосы пропускания f_{3dB} от напряжения смещения для всех длин исследованных фотодетекторов представлены на рис. 6. Полученные зависимости для f_{3dB} в волноводном фотодетекторе определяются двумя процессами. В области низких напряжений обратного смещения частота ограничена временем транспорта фотогенерированных носителей от поглощающей области к контактам (transition time, t). В данном случае предельные значения частоты f_t , связанной с транспортом носителей ($f_t \sim 1/t$), предположительно определяются низкой дрейфовой скоростью дырок в GaAs, которая зависит от напряженности электрического поля в i -области. Увеличение обратного смещения позволяет увеличить быстродействие фотодетектора до некоторого

предельного значения частоты, после чего наблюдаемые зависимости выходят в насыщение при напряжении смещения более -7 – -10 В. Дальнейшее увеличение напряжения вызывает лишь незначительный рост частоты отсечки (до 5.8 ГГц при 20 В для ФД длиной 92 мкм). Наблюдаемое насыщение связано с независимым от величины напряжения смещения временем перезарядки *RC*-цепи:

$$f_{RC} \sim \frac{1}{2\pi R(C_j + C_p)},$$

где R — сопротивление нагрузки (обычно 50 Ом), C_j — емкость фотодетектора, C_p — емкость контактных площадок. Тот факт, что с увеличением длины фотодетектора наблюдается уменьшение предельной частоты f_{3dB} , позволяет предположить, что полоса пропускания

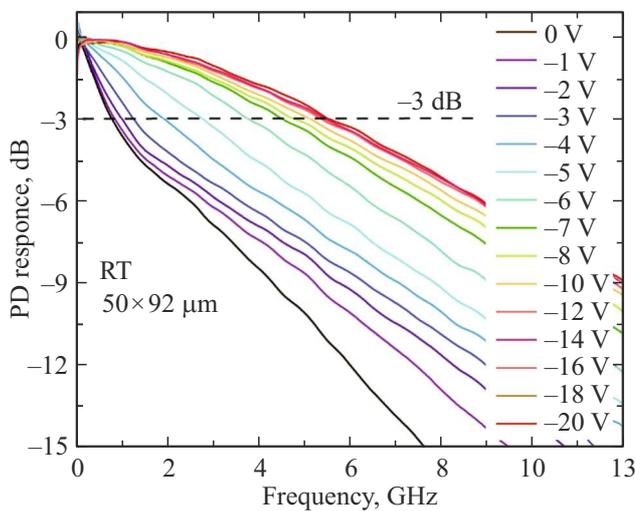


Рис. 5. Зависимости высокочастотного отклика ФД 50×92 мкм, измеренные при различных напряжениях обратного смещения.

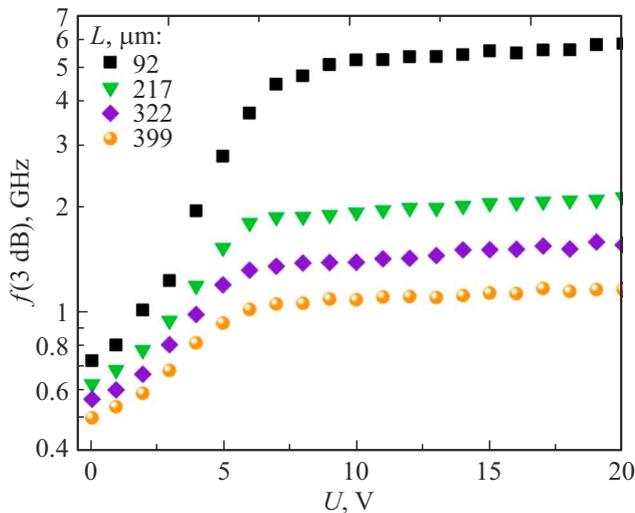


Рис. 6. Зависимости частоты f_{3dB} от напряжения смещения для всех длин исследованных фотодетекторов.

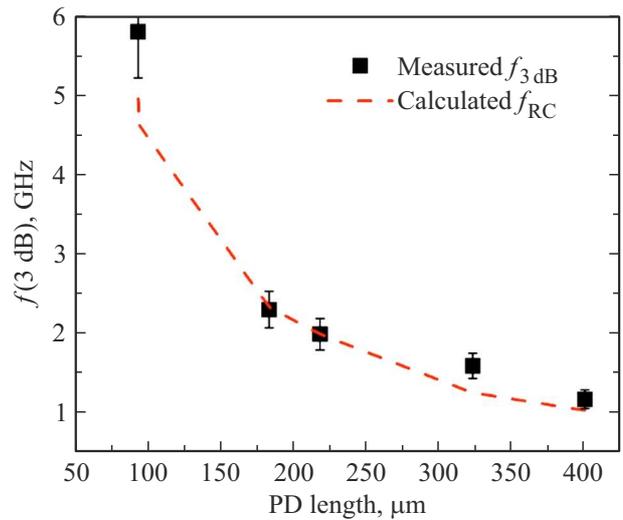


Рис. 7. Экспериментальные значения f_{3dB} (квадраты) и расчетной частоты отсечки f_{RC} (пунктир) в зависимости от длины исследованных фотодетекторов.

фотодетектора ограничена в основном его емкостью, которая растет с ростом площади фотодетектора.

Для оценки предельной частоты отсечки f_{RC} нами были определены параметры эквивалентной схемы фотодетектора путем подгонки реальной и мнимой частей параметра S_{22} , используя симулятор электрических схем Qucs. Емкость фотодетектора уменьшается пропорционально его площади с 2840 фФ до 670 фФ, при этом удельная емкость фотодетектора достигает 0.14 фФ/мкм². Последовательное сопротивление R_s фотодетекторов составило $R_s \sim 4$ – 5 Ом. Емкость контактных площадок керамической платы не превышает 60 фФ, а индуктивность золотой проволоки, соединяющей *p*-контакт фотодетектора с *S*-площадкой, лежит в диапазоне 450–500 пГ. На рис. 7 представлены значения частоты отсечки f_{RC} , рассчитанные из восстановленных эквивалентных схем исследованных фотодетекторов. Видно, что полученные максимальные значения полосы пропускания частоты f_{3dB} для всех фотодетекторов определяются постоянной времени паразитной эквивалентной электрической *RC*-цепочки.

4. Заключение

В работе исследованы статические и динамические характеристики при комнатной температуре волноводных фотодетекторов, в качестве поглощающей области которых использовались 6 слоев *InGaAs/GaAs* квантовых яма-точек. Спектральная полоса поглощения *InGaAs/GaAs* квантовых яма-точек находится в диапазоне от 900 до 1100 нм. Получено низкое значение плотности темнового тока 1.1 мкА/см² и предельное быстродействие 5.6 ГГц, ограниченное постоянной времени паразитной эквивалентной электрической *RC*-цепочки

для фотодетектора размером 50×92 мкм. Анализ механизмов, ограничивающих предельное быстродействие приборов, показал необходимость уменьшения времени пролета в i -области для дырок и уменьшения площади приборов снижения постоянной времени паразитной эквивалентной электрической RC -цепочки. В текущей реализации такие фотоприемники могут быть успешно использованы для интеграции с планарными излучающими микролазерами для создания полностью оптических высокоскоростных каналов передачи данных и оптических сенсоров.

Благодарности

Работы выполнены на Уникальной научной установке „Комплексный оптоэлектронный стенд НИУ ВШЭ — Санкт-Петербург“.

Финансирование работы

Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ. Работа Е.С. Колодезного выполнена при финансовой поддержке программы „Приоритет 2030“ в части исследования фототока детекторов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.E. Bowers, C.A. Burrus. *Electron. Lett.*, **22**, 905 (1986).
- [2] H. Wang, J. Zhang, G. Zhang, Y. Chen, Y.-C. Huang, X. Gong. *Optics Lett.*, **46**, 2099 (2021).
- [3] L. Vivien, A. Polzer, D. Marris-Morini, J. Osmond, J.M. Hartmann, P. Crozat, E. Cassan, C. Kopp, H. Zimmermann, J.M. Fédéli. *Opt. Express*, **20**, 1096 (2012).
- [4] K. Kato, A. Kozen, Y. Muramoto, Y. Itaya, T. Nagatsuma, M. Yaita. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **6**, 719 (1994).
- [5] Y. Wan, Z. Zhang, R. Chao, J. Norman, D. Jung, C. Shang, Q. Li, M. Kennedy, D. Liang, C. Zhang, J. Shi, A.C. Gossard, K.M. Lau, J.E. Bowers. *Opt. Express*, **25**, 27715 (2017).
- [6] A. Beling, A.S. Cross, M. Piels, J. Peters, Q. Zhou, J.E. Bowers, J.C. Campbell. *Opt. Express*, **21**, 25901 (2013).
- [7] Y. Wan, C. Shang, J. Huang, Z. Xie, A. Jain, J. Norman, B. Chen, A.C. Gossard, J.E. Bowers. *ACS Nano*, **14**, 3519 (2020).
- [8] N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, A.S. Payusov, A.A. Serin, Yu.M. Shernyakov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, A.M. Nadtochiy, A.E. Zhukov. *Semicond. Sci. Techn.*, **36**, 015008 (2021).
- [9] A.M. Nadtochiy, N.Yu. Gordeev, A.A. Kharchenko, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, Y.S. Berdnikov, Y.M. Shernyakov, M.V. Maximov, A.E. Zhukov. *J. Lightwave Technol.*, **39**, 7479, (2021).
- [10] N.V. Kryzhanovskaya, F.I. Zubov, E.I. Moiseev, A.S. Dragunova, K.A. Ivanov, M.V. Maximov, N.A. Kaluzhnyy, S.A. Mintairov, S.V. Mikushev, M.M. Kulagina, J.A. Guseva, A.I. Likhachev, A.E. Zhukov. *Las. Phys. Lett.*, **19**, 016201 (2022).
- [11] A.M. Nadtochiy, M.V. Maximov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, V.N. Nevedomskiy, S.S. Rouvimov, A.E. Zhukov. *Phys. Status Solidi B*, **255**, 1800123 (2018).
- [12] A. Zhukov, S. Blokhin, N. Maleev, N. Kryzhanovskaya, E. Moiseev, A. Nadtochiy, S. Mintairov, N. Kalyuzhnyy, F. Zubov, M. Maximov. *Opt. Express*, **29** (25), 40677 (2021).
- [13] 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).
- [14] J. Huang, Y. Wan, D. Jung, J. Norman, C. Shang, Q. Li, K.M. Lau, A.C. Gossard, J.E. Bowers, B. Chen. *ACS Photonics*, **6**, 1100 (2019).

Редактор Г.А. Оганесян

Investigation of a $p-i-n$ photodetector with an absorbing medium based on InGaAs/GaAs quantum well dots

N.V. Kryzhanovskaya¹, S.A. Blokhin^{2,1}, I.S. Makhov¹, E.I. Moiseev¹, A.M. Nadtochiy¹, N.A. Fominykh¹, S.A. Mintairov², N.A. Kalyuzhnyy², Yu.A. Guseva², M.M. Kulagina², F.I. Zubov^{3,1}, E.S. Kolodeznyi⁴, M.V. Maximov^{3,1}, A.E. Zhukov¹

¹ HSE University,
190008 St. Petersburg, Russia
² Ioffe institute,
194021 St. Petersburg, Russia
³ Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia
⁴ ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

Abstract The static and dynamic characteristics of waveguide photodetectors with an absorbing region based on InGaAs/GaAs quantum well-dots were studied at room temperature. The absorption band of InGaAs/GaAs quantum well-dots is in the spectral range from 900 to 1100 nm. The waveguide photodetectors have a width of $50 \mu\text{m}$ and a length of the absorbing region from $92 \mu\text{m}$ to $400 \mu\text{m}$. A low dark current density (1.1 and $22 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ at -1 and -20 V) and cut off frequency of 5.6 GHz, limited by the time constant of a parasitic equivalent electric RC circuit, were obtained.