

Исследование влияния степени легирования квантовых ям на рабочую температуру QWIP

А. Л. Дудин², В. И. Зубков¹, Л. С. Богословская^{1,2✉}

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²АО "Светлана-Рост", Санкт-Петербург, Россия

✉Lana.stoliarowa@yandex.ru

Аннотация

Введение. Инфракрасные фотодетекторы на основе квантовых ям (QWIP) являются одними из ключевых компонентов современных систем инфракрасного видения. QWIP широко применяются в различных областях, включая космические исследования, медицину и др. Одна из ключевых характеристик QWIP – температура BLIP (background limited performance). Эта температура определяется из условия равенства фоновых и темновых токов, протекающих через фотодетектор, и является рабочей температурой фотодетектора. Увеличение рабочей температуры позволяет значительно снизить требования к системе охлаждения. Поскольку фоновый ток зависит от условий окружающей среды и апертуры криостата, целесообразно снижать значения темнового тока, которые напрямую зависят от степени легирования квантовых ям. Однако легирование влияет на чувствительность фотодетектора, поэтому необходимо подобрать оптимальный уровень легирования, позволяющий найти компромисс между снижением чувствительности и уровня темнового тока.

Цель работы. Исследование влияния степени легирования квантовых ям на основе системы материалов GaAs/AlGaAs на температуру BLIP.

Материалы и методы. Для проведения эксперимента методом молекулярно-пучковой эпитаксии были изготовлены тестовые фотоприемники. Параметры образцов подбирались таким образом, чтобы длина волны максимума спектральной чувствительности находилась в диапазоне 8...9 мкм. Варьируемым параметром являлась степень легирования квантовых ям кремнием. После прохождения технологического маршрута планарной модификации на всех тестовых фотоприемниках были сняты вольт-амперные характеристики в диапазоне температур 65...77 К и построены графики статической токовой чувствительности.

Результаты. Показано, что снижение уровня легирования с $9.0 \cdot 10^{17}$ до $4.5 \cdot 10^{17}$ см⁻³ приводит к значительному уменьшению темнового тока в рабочем интервале напряжений. Это позволило повысить температуру BLIP с 69 до 71 К. При этом наблюдалось ожидаемое снижение фоточувствительности, однако ее значение оставалось выше порогового уровня 0.15 А/Вт.

Заключение. Полученные данные демонстрируют, что оптимизация уровня легирования квантовых ям в QWIP позволяет уменьшить уровень темнового тока фотодетектора. Такой фотодетектор можно использовать при более высоких температурах.

Ключевые слова: инфракрасные фотодетекторы с квантовыми ямами, темновой ток, фоточувствительность, вольт-амперные характеристики, BLIP

Для цитирования: Дудин А. Л., Зубков В. И., Богословская Л. С. Исследование влияния степени легирования квантовых ям на рабочую температуру QWIP // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 3. С. 35–43.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-35-43

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы благодарят коллег из АО "Светлана-Рост" за подготовку образцов и осуществление возможности проведения необходимых измерений в сжатые сроки.

Статья поступила в редакцию 28.01.2026; принята к публикации после рецензирования 02.04.2026; опубликована онлайн 29.06.2026



Investigation of the Effect of Quantum Well Doping on QWIP Operating Temperature

Anatoliy L. Dudin², Vasily I. Zubkov¹, Lana S. Bogoslovskaya^{1,2✉}

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Joint Stock Company "Svetlana-Rost", St Petersburg, Russia

✉ Lana.stoliarowa@yandex.ru

Abstract

Introduction. Quantum well infrared photodetectors (QWIPs) are among the key components of modern infrared imaging systems and are widely used for various applications, including space research, medical diagnostics, etc. One of the most important characteristics of a QWIP is the background-limited performance (BLIP) temperature, which is determined based on the equality condition between the background current and the dark current flowing through the photodetector. This parameter represents the operating temperature of the photodetector. Increasing the operating temperature can significantly reduce the requirements imposed on the cooling system. Since the background current depends on environmental conditions and the cryostat aperture, it is primarily required to reduce the dark current values. The dark current is strongly dependent on the doping level of the quantum wells. However, the doping concentration also affects the photodetector sensitivity, creating a trade-off between sensitivity and dark current level.

Aim. To investigate the effect of the doping level of quantum wells based on the GaAs/AlGaAs material system on the BLIP temperature.

Materials and methods. Experimental photodetectors were fabricated by molecular beam epitaxy. The parameters of the samples were selected to ensure a peak spectral response wavelength in the range of 8...9 μm. The variable parameter was the doping level of the quantum wells with silicon. After completing the planar processing technological route, the current–voltage characteristics of all test photodetectors were measured in the temperature range of 65...77 K, and the corresponding curves of static current sensitivity were plotted.

Results. A reduction in the doping level from $9.0 \cdot 10^{17}$ to $4.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ was found to lead to a significant decrease in the dark current within the operating voltage range. This made it possible to increase the BLIP temperature from 69 to 71 K. This was associated with the expected decrease in photosensitivity; however, its value remained above the threshold level of 0.15 A/W.

Conclusion. The obtained data demonstrate that optimization of the quantum well doping level in QWIPs provides for a reduction in the photodetector dark current. As a result, the device can be operated at higher temperatures.

Keywords: quantum well infrared photodetectors, dark current, photosensitivity, current–voltage characteristics, BLIP

For citation: Dudin A. L., Zubkov V. I., Bogoslovskaya L. S. Investigation of the Effect of Quantum Well Doping on QWIP Operating Temperature. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 35–43.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-35-43

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgments. The authors thank their colleagues at JSC Svetlana-Rost for preparing the samples and making it possible to carry out the necessary measurements in a short time.

Submitted 28.01.2026; accepted 02.04.2026; published online 29.06.2026

Введение. Матричные инфракрасные фотодетекторы с квантовыми ямами (Quantum Well Infrared Photodetector – QWIP) представляют собой важный класс полупроводниковых устройств, предназначенных для обнаружения среднего (3...5 мкм) [1] и длинноволнового

(8...14 мкм) [2] инфракрасного излучения. Благодаря многочисленным исследованиям, посвященным стабилизации и оптимизации их параметров (например, описанным в [3–5]), в настоящее время QWIP можно считать устоявшейся технологией на рынке ИК-фотодетекторов [6].

В настоящий момент QWIP пользуются спросом в астрономии [7], космических приложениях [8], медицине [9] и многих других областях гражданского назначения [10].

Один из наиболее важных параметров для оценки производительности и эффективности фотодетектора – температура фоновограниченного режима работы (Background-Limited Infrared Performance – BLIP) [11]. При этой температуре фотодетектор регистрирует предельно малые сигналы, ограниченные только флуктуацией фона.

Температура BLIP определяется из условия равенства тока собственных шумов (темнового тока), обусловленных термогенерацией носителей заряда, и тока, индуцированного фоновым излучением (фоновый ток) в QWIP. Поэтому под температурой BLIP обычно подразумевается рабочая температура фотодетектора.

Самое простое представление n -QWIP, созданного на основе GaAs/AlGaAs, показано на рис. 1 [12]. Работа детектора основана на фотоэмиссии электронов из квантовых ям. Контакты с обеих сторон выполнены из GaAs n -типа. По своей сути данное устройство является униполярным фоторезистором.

Существует 3 механизма генерации темнового тока:

1. Термоионная эмиссия – носители заряда (электроны) получают достаточно тепловой энергии, чтобы преодолеть барьер квантовой ямы и попасть в зону проводимости. В зоне проводимости они ускоряются электрическим полем и создают ток.

2. Туннелирование через вершину барьера – при достаточном значении напряжения смещения электроны могут туннелировать через небольшой потенциальный барьер, возникающий из-за изгиба зон.

3. Туннелирование через барьер – волновые функции электронов на основных (низших) уровнях соседних квантовых ям имеют некоторое перекрытие и при определенных условиях (при очень низких температурах) могут туннелировать непосредственно через барьер.

Более подробно о механизмах генерации темнового тока изложено в [13].

При широких барьерах и не слишком больших напряжениях смещения принципиально неустранимым механизмом возникновения темнового тока в QWIP является термоионная эмиссия электронов из квантовых ям. Плотность темнового тока, эмитированного множеством квантовыми ямами, в QWIP можно оценить с помощью соотношения [12]

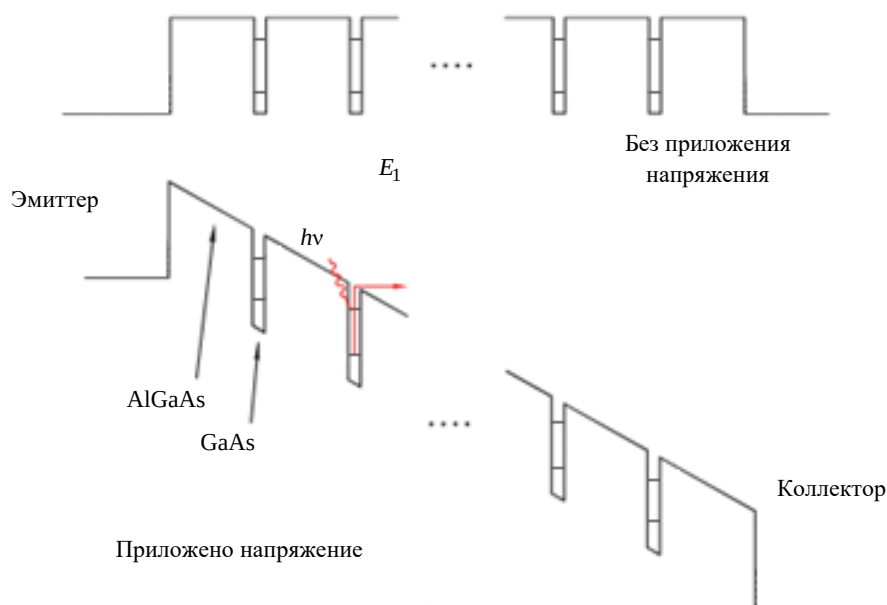


Рис. 1. Схематичный профиль зоны проводимости n -QWIP на основе GaAs/AlGaAs при нулевом (сверху) и ненулевом (снизу) смещении. Заселение квантовых ям электронами обеспечивается легированием кремнием

Fig. 1. Schematic conduction band-edge profile of a GaAs/AlGaAs n -QWIP under zero (above) and finite (below) bias. The electron population in the n -type wells is provided by silicon doping

$$j_{\text{dark}} \sim kT \exp\left(-\frac{E_{\text{акт}}}{kT}\right),$$

где k – постоянная Больцмана; T – рабочая температура фотодетектора; $E_{\text{акт}}$ – энергия термической активации, равная разности между энергетическим уровнем потенциального барьера и энергией Ферми в квантовой яме.

Эффективность работы QWIP в значительной степени определяется значением коэффициента поглощения падающего электромагнитного излучения в активной области. Ключевым параметром, управляющим данным процессом, является концентрация свободных носителей заряда (электронов для QWIP n -типа) в зоне проводимости квантовых ям.

Для того чтобы обеспечить достаточную плотность состояний [14], квантовые ямы QWIP легируют до значений порядка $10^{17} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [15, 16]. Концентрация легирующей примеси существенно влияет на положение уровня Ферми и на темновой ток [15].

Поскольку температура BLIP определяется условием равенства темнового и фонового токов, уменьшение темнового тока смещает точку их пересечения в область более высоких температур. Это означает, что для достижения темновым током значения фонового потребуется более высокая температура.

Один из способов уменьшения темнового тока – снижение степени легирования квантовых ям QWIP. Однако при этом линейно уменьшается поглощение излучения [17].

Снижение фоточувствительности по линейному закону менее существенно по сравнению с экспоненциальным подавлением темнового тока. Следовательно, существует такая концентрация доноров в яме, при которой можно найти компромисс между темновым током и фоточувствительностью детектора.

Целью описываемой работы было изучение влияния уровня легирования квантовых ям QWIP на значение температуры BLIP и выбор его оптимального значения.

Материалы и методы исследования. В рамках проведения эксперимента на 100-миллиметровых подложках GaAs ориентации (100) было изготовлено несколько образцов

QWIP, образующих 2 серии (А и В) с различающимися параметрами.

Эпитаксиальные слои выращивались на российской установке молекулярно-пучковой эпитаксии, разработанной ЗАО "НТО" STE35.

Изготовленные образцы представляли собой массив квантовых ям, заключенный между двумя высоколегированными слоями GaAs (контактными слоями). Массив квантовых ям (фоточувствительная область структур) содержал 50 квантовых ям GaAs, разделенных барьерами AlGaAs.

Параметры квантовых ям (ширина ям и высота барьеров) подбирались таким образом, чтобы обеспечить наличие двух уровней в зоне проводимости, а именно – 50 и 300 Å (ширина квантовой ямы и барьера соответственно), содержание алюминия в барьере 29 % (высота барьера). Многочисленные эксперименты, проведенные на АО "Светлана-Рост", показывают, что выбранные параметры обеспечивают максимум спектральной чувствительности на длинах волн в диапазоне от 8.25 до 8.75 мкм.

Контроль параметров эпитаксиальных структур осуществлялся с помощью анализа спектров фотолюминесценции. По форме и положению пика спектра фотолюминесценции делались выводы об однородности массива квантовых ям и о положении первого (основного) уровня (E_1 , рис. 1) в квантовых ямах соответственно.

Квантовые ямы легировались *in situ* донорной примесью – кремнием. Варьируемым параметром являлась концентрация примеси в квантовой яме (табл. 1).

Для проведения измерений на выращенных гетероструктурах были изготовлены тестовые фотоприемники [18]. Посредством планарной технологии были сформированы следующие структурные элементы, соответствующие матрицам QWIP:

1. Дифракционная решетка – ключевой элемент, обеспечивающий эффективное поглощение электромагнитного излучения в гетероструктуре с квантовыми ямами. Поглощение излучения и

Табл. 1. Данные образцов

Tab. 1. Sample data

Серия образцов	Концентрация легирующей примеси, см^{-3}
А	$9.0 \cdot 10^{17}$
В	$4.5 \cdot 10^{17}$

межподзонные переходы электронов в квантовых ямах возможны только при наличии у излучения компоненты электрического поля, направленной вдоль квантовых ям. Поскольку падающее излучение обычно направлено по нормали к поверхности, его волновой вектор лежит в плоскости ям, что делает прямое поглощение невозможным. Дифракционная решетка спроектирована таким образом, чтобы первый порядок дифракции (максимум излучения) отклонялся под максимальным углом к нормали.

2. Омические контакты к высоколегированным слоям GaAs, сформированные методом вакуумного электронно-лучевого напыления многослойной металлической системы на основе сплава Ni, Ge, Au с последующим отжигом.

3. Изоляция пикселей, включающая 2 ключевых этапа – формирование глубоких мезоструктур посредством плазмохимического травления в индуктивно связанной плазме до достижения нижнего контактного слоя и последующую пассивацию поверхности пленкой диэлектрика.

4. Индиевые столбики – для монтажа (гибридизации) тестовых фотоприемников методом перевернутого кристалла (технология flip-chip). Совмещение тестового фотоприемника с подкристалльной платой осуществлялось на установке Tresky T-3002 FC3.

Тестовые фотоприемники, смонтированные на подкристалльные платы, образовывали микросборки. Каждая микросборка закреплялась на медном держателе с помощью термопроводящей пасты и помещалась в заливной азотный криостат JANIS VPF-100. Держатель соединялся проволочными проводниками с керамическими площадками, подключенными к BNC-кабелю внутри криостата. Электрическое напряжение прикладывалось к структуре с помощью измерительного прибора Keithley 4200.

Аппаратно-программным комплексом Keithley 4200 были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) на различных температурах в темноте и в условиях фонового излучения. Темновые условия обеспечивались за счет использования холодного экрана, который полностью экранировал криостат от фонового излучения.

Фоновый ток измерялся в холодном экране с диафрагмой в апертуре $f/1.5$ при температуре окружающей среды 300 К. Схема стандарт-

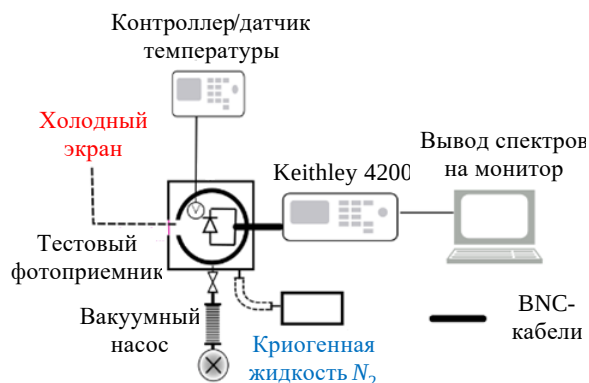


Рис. 2. Схематическое изображение стандартной методики измерений ВАХ QWIP

Fig. 2. Schematic representation of the standard IV measurement technique for QWIP

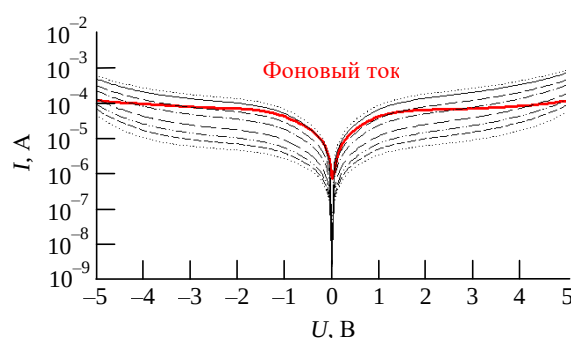


Рис. 3. Семейство темновых ВАХ QWIP, измеренных при температурах от 65 до 77 К. Красной линией выделена фоновая ВАХ

Fig. 3. QWIP dark current-voltage characteristics (I-V curves), measured in the temperature range from 65 to 77 K. The background I-V curve measured at 65 K is highlighted by the red line

ного экспериментального стенда для измерения представлена на рис. 2.

Типичное семейство темновых ВАХ показано на рис. 3. Температура, при которой измерялась темновая ВАХ, совпадающая с фоновой ВАХ на рабочем напряжении фотоприемника, считалась температурой BLIP.

Для контроля влияния достаточности степени легирования также были построены графики зависимости статической токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения для всех образцов. Значение токовой чувствительности при каждом значении приложенного напряжения:

$$S = \frac{\Delta I}{JA},$$

где S – значение токовой чувствительности, А/Вт; ΔI – разность между протекающими через тестовый фотоприемник токами при облу-

чении его ИК-излучением и в отсутствие облучения на заданном напряжении смещения, A ; J – плотность излучения, падающего на тестовый фотоприемник на заданной длине волны, Вт/см²; A – площадь фоточувствительной поверхности тестового фотоприемника размерами 500×500 мкм. Более подробно расчет и построение графиков статической токовой чувствительности изложены в [13].

Результаты. Пики спектральной чувствительности образцов серий А и В наблюдались при 8.37 и 8.31 мкм соответственно. Близкое совпадение спектральных характеристик подтверждает идентичность всех параметров структур, за исключением уровня легирования, что обосновывает корректность их сравнительного анализа.

На рис. 4 представлены типичные темновые ВАХ образцов серий А и В при температуре 65 К. Темновой ток через образец серии В в рабочем интервале напряжений (1.5...3.0 В) практически в 6 раз ниже, чем ток через образец серии А.

На рис. 5 представлены графики зависимости токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения образцов серий А и В при длине волны, соответствующей максимуму их спектральной фоточувствительности. Для образца серии В наблюдается снижение токовой чувствительности. В соответствии с ожиданиями уменьшение значений данного параметра оказалось менее выраженным по сравнению со снижением значений темнового тока. На рабочем напряжении 3 В чувствительность образца серии А превышала аналогичный показатель образца серии В в 1.5 раза.

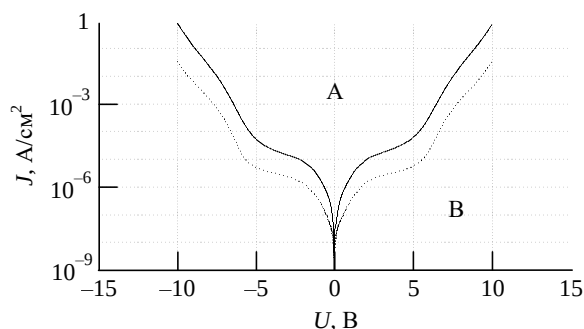


Рис. 4. ВАХ при температуре 65 К. По вертикали приведены значения плотности темнового тока, по горизонтали – значения приложенного напряжения смещения

Fig. 4. Current-voltage characteristics at a temperature of 65 K. The vertical axis shows the dark current density, and the horizontal axis shows the applied bias voltage

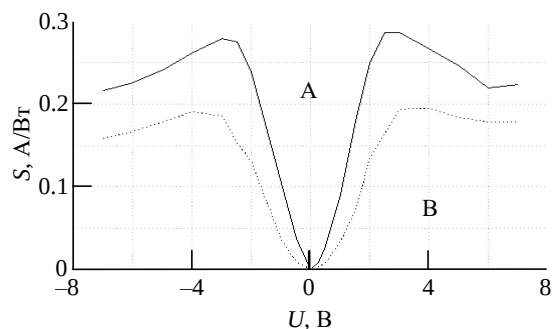


Рис. 5. Графики зависимости токовой чувствительности образцов в максимуме спектра фоточувствительности при температуре 77 К. По вертикали приведены расчетные значения токовой чувствительности; по горизонтали – значения приложенного напряжения смещения

Fig. 5. Spectra of static current sensitivity at the peak of the photosensitivity spectrum at a temperature of 77 K. The vertical axis shows the calculated values of current sensitivity, and the horizontal axis shows the applied bias voltage

Табл. 2. Результаты исследования

Tab. 2. Research results

Серия образцов	Концентрация примеси в квантовой яме, см ⁻³	Средняя температура BLIP, К
A	$9.0 \cdot 10^{17}$	69
B	$4.5 \cdot 10^{17}$	71

В табл. 2 сведены ключевые результаты исследования.

Закключение. Исследовано влияние степени легирования квантовых ям QWIP на значение температуры BLIP.

Результаты исследования показывают, что снижение уровня легирования квантовых ям приводит к уменьшению силы темнового тока. Это, в свою очередь, расширяет температурный диапазон работы фотодетектора в режиме фонового ограничения (BLIP).

Также результаты исследования свидетельствуют о снижении фоточувствительности при уменьшении степени легирования квантовых ям. Тем не менее, максимальное значение фоточувствительности превышает пороговый уровень 0.15 А/Вт, что подтверждает допустимость данного решения при оптимизации рабочих параметров фотодетектора.

Нивелировать эффект снижения фоточувствительности можно за счет оптимизации геометрических параметров дифракционных решеток. Применение дифракционных решеток способствует увеличению эффективности

поглощения оптического излучения на заданной длине волны, что приводит к росту фоточувствительности. При этом дифракционные решетки не влияют на силу темнового тока. Детальное исследование влияния различных конфигураций дифракционных решеток требует отдельного рассмотрения и выходит за рамки описываемой работы.

Таким образом, практическим результатом проведенной работы является увеличение температуры BLIP тестовых образцов QWIP с 69 до 71 К при сохранении параметров фоточувствительности выше порогового значения 0.15 А/Вт. Достигнутый результат снижает требования к системе охлаждения, в том числе – уменьшает ее энергопотребление и стоимость эксплуатации.

Список литературы

1. Mid-infrared semiconductor optoelectronics / ed. by A. Krier. London: Springer, 2007. 752 p. doi: 10.1007/1-84628-209-8
2. QWIP: still the best solution for high-end applications in LWIR / R. Ivanov, S. Högnadóttir, D. Ramos, D. Evans, D. Visser, D. Rihtnesberg, A. Smuk, S. Becanovic, S. Sehlin, S. Almqvist, S. Smuk, L. Höglund, E. Costard // Infrared Technology and Applications XLIX. Proc. of SPIE. 2023. Vol. 12534. P. 356–364.
3. Quantum well infrared photodetector research and development at Jet Propulsion Laboratory / S. D. Gunapala, S. V. Bandara, J. K. Liu, E. M. Luong, S. B. Rafol, J. M. Mumolo, D. Z. Ting, J. J. Bock, M. E. Ressler, M. W. Werner, P. D. LeVan, R. Chehayeb, A. Kukkonen, M. Levy, P. LeVan, M. A. Fauci // Infrared Physics & Technology. 2001. Vol. 42, iss. 3–5. P. 267–282. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00085-8
4. QWIP structural optimization / K.-K. Choi, C.-H. Lin, K.-M. Leung, T. Tamir // Materials for Infrared Detectors II. Proc. of SPIE. 2002. Vol. 4795. P. 27–38. doi: 10.1117/12.453827
5. Berurier A., Nedelcu A. Optimization of light polarization sensitivity in QWIP detectors // Infrared Physics & Technology. 2013. Vol. 59. P. 118–124. doi: 10.1016/j.infrared.2012.12.025
6. An LWIR QWIP FPA with sub-5mK NETD and large dynamic range / H. Lu, N. Li, X. Zhou, Zh. Li, P. Chen, J. Xu, X. Li, W. Lu // Infrared Physics & Technology. 2025. Vol. 144. Art. № 105629. doi: 10.1016/j.infrared.2024.105629
7. Das M. K., Lal R. K. Modeling of Quantum Well Infrared Photo Detector for Long Wavelength Infrared Detection // IETE J. of Research. 2017. Vol. 63, iss. 5. P. 719–727. doi: 10.1080/03772063.2017.1313138
8. Optimisation of QWIP detectors for space applications / S. Smuk, A. Gromov, J. Alverbro, P. Merken, T. Souverijns, D. Haga, H. Malm, C. Asplund, J. Borglind, S. Becanovic, P. Tinghag, H. Martijn, B. Hirschauer // Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX. Proc. of SPIE. 2005. Vol. 5978. P. 397–406. doi: 10.1117/12.632799
9. Etteh N. E. I., Harrison P. Quantum mechanical scattering investigation of the dark current in quantum well infrared photodetectors (QWIPs) // Infrared Physics & Technology. 2003. Vol. 44, iss. 5–6. P. 473–480. doi: 10.1016/S1350-4495(03)00169-5
10. Downs C., Vandervelde T. E. Progress in infrared photodetectors since 2000 // Sensors. 2013. Vol. 13, iss. 4. P. 5054–5098. doi: 10.3390/s130405054
11. Bhan R. K., Dhar V. Recent infrared detector technologies, applications, trends and development of HgCdTe based cooled infrared focal plane arrays and their characterization // Opto-Electronics Review. 2019. Vol. 27, № 2. P. 174–193. doi: 10.1016/j.opelre.2019.04.004
12. Schneider H., Liu H. C. Quantum well infrared photodetectors: physics and applications. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007. 248 p. doi: 10.1007/978-3-540-36324-8
13. Богословская Л. С., Дудин А. Л., Зубков В. И. Исследование влияния ширины барьера на рабочее напряжение QWIP // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 72–80. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-72-80
14. GaAs/AlGaAs Quantenfilm Photodetektoren für Kameras im 8...12µm-Bereich / H. Schneider, P. Koidl, M. Walther, J. Fleißner, J. Ziegler // tm-Technisches Messen. 1999. Vol. 66, № 9. P. 344–349.
15. Billaha A., Das M. K. Influence of doping on the performance of GaAs/AlGaAs QWIP for long wavelength applications // Opto-Electronics Review. 2016. Vol. 24, № 1. P. 25–33. doi: 10.1515/oere-2016-0006
16. I–V characterization of a quantum well infrared photodetector with stepped and graded barriers / F. Nutku, A. Erol, M. Gunes, L. B. Buklu, Y. Ergun, M. C. Arıkan // Superlattices and Microstructures. 2012. Vol. 52, № 3. P. 585–593. doi: 10.1016/j.spmi.2012.06.010
17. Optimal doping density for quantum-well infrared photodetector performance / Y. Yang, H. C. Liu, W. Z. Shen, N. Li, W. Lu, Z. R. Wasilewski // IEEE J. of Quantum Electronics. 2009. Vol. 45, № 6. P. 623–628. doi: 10.1109/JQE.2009.2013119
18. Стандартизация технологий изготовления матриц для охлаждаемых тепловизоров – "тепло" или "холодно"? / А. Л. Дудин, Н. И. Кацавец, Д. М. Красовицкий, А. Г. Филаретов, В. П. Чалый // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 2. С. 114–119. doi: 10.22184/1992-4178.2022.213.2.114.119

Информация об авторах

Дудин Анатолий Леонидович – специалист в области физики и технологии полупроводниковых приборов (1996, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), заместитель генерального директора по производству и технологическим разработкам АО "Светлана-Рост". Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – СВЧ; технология полупроводниковых приборов; QWIP.

Адрес: АО "Светлана-Рост", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: a.dudin@svrost.ru

<https://orcid.org/0009-0007-2005-4304>

Зубков Василий Иванович – доктор физико-математических наук (2008), профессор (2018), профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – физика твердого тела и физика полупроводников; нанoeлектроника; моделирование и диагностика квантово-размерных гетероструктур.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vzubkovspb@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6830-6899>

Богословская Лана Сергеевна – магистр по специальности "Нанотехнологии и микросистемная техника" (2023, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирантка Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер-технолог АО "Светлана-Рост", сквозной технолог по направлению QWIP. Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – технология изготовления полупроводниковых микросхем; QWIP.

Адрес: АО "Светлана-Рост", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: lana.stoliarowa@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0002-9538-1055>

References

1. Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics. Ed. by Krier A. London, Springer, 2007, 752 p. doi: 10.1007/1-84628-209-8
2. Ivanov R., Högnadóttir S., Ramos D., Evans D., Visser D., Rihtnesberg D., Smuk A., Becanovic S., Sehlín S., Almqvist S., Smuk S., Höglund L., Costard E. QWIP: Still the Best Solution for High-End Applications in LWIR. Infrared Technology and Applications XLIX. Proc. of SPIE. 2023, vol. 12534, pp. 356–364.
3. Gunapala S. D., Bandara S. V., Liu J. K., Luong E. M., Rafol S. B., Mumolo J. M., Ting D. Z., Bock J. J., Ressler M. E., Werner M. W., LeVan P. D., Chehayeb R., Kukkonen A., Levy M., LeVan P., Fauci M. A. Quantum Well Infrared Photodetector Research and Development at Jet Propulsion Laboratory. Infrared Physics & Technology. 2001, vol. 42, iss. 3–5, pp. 267–282. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00085-8
4. Choi K.-K., Lin C.-H., Leung K.-M., Tamir T. QWIP Structural Optimization. Materials for Infrared Detectors II. Proc. of SPIE. 2002, vol. 4795, pp. 27–38. doi: 10.1117/12.453827
5. Berurier A., Nedelcu A. Optimization of Light Polarization Sensitivity in QWIP Detectors. Infrared Physics & Technology. 2013, vol. 59, pp. 118–124. doi: 10.1016/j.infrared.2012.12.025
6. Lu H., Li N., Zhou X., Li Zh., Chen P., Xu J., Li X., Lu W. An LWIR QWIP FPA with Sub-5mK NETD and Large Dynamic Range. Infrared Physics & Technology. 2025, vol. 144, art. no. 105629. doi: 10.1016/j.infrared.2024.105629
7. Das M. K., Lal R. K. Modeling of Quantum Well Infrared Photo Detector for Long Wavelength Infrared Detection. IETE J. of Research. 2017, vol. 63, iss. 5, pp. 719–727. doi: 10.1080/03772063.2017.1313138
8. Smuk S., Gromov A., Alverbro J., Merken P., Souverijns T., Haga D., Malm H., Asplund C., Borglind J., Becanovic S., Tinghag P., Martijn H., Hirschauer B. Optimisation of QWIP Detectors for Space Applications. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX. Proc. of SPIE. 2005, vol. 5978, pp. 397–406. doi: 10.1117/12.632799
9. Etteh N. E. I., Harrison P. Quantum Mechanical Scattering Investigation of the Dark Current in Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIPs). Infrared Physics & Technology. 2003, vol. 44, iss. 5–6, pp. 473–480. doi: 10.1016/S1350-4495(03)00169-5
10. Downs C., Vandervelde T. E. Progress in Infrared Photodetectors Since 2000. Sensors. 2013, vol. 13, iss. 4, pp. 5054–5098. doi: 10.3390/s130405054
11. Bhan R. K., Dhar V. Recent Infrared Detector Technologies, Applications, Trends and Development of HgCdTe Based Cooled Infrared Focal Plane Arrays and Their Characterization. Opto-Electronics Review. 2019, vol. 27, no. 2, pp. 174–193. doi: 10.1016/j.opelre.2019.04.004
12. Schneider H., Liu H. C. Quantum Well Infrared Photodetectors: Physics and Applications. Berlin, Heidelberg, Springer, 2007, 248 p. doi: 10.1007/978-3-540-36324-8

13. Bogoslovskaya L. S., Dudin A. L., Zubkov V. I. Influence of Barrier Width on QWIP Operating Voltage. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 72–80.
doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-72-80

14. Schneider H., Koidl P., Walther M., Fleißner J., Ziegler J. GaAs/AlGaAs Quantenfilm Photodetektoren für Kameras im 8...12µm-Bereich. *tm-Technisches Messen*. 1999, vol. 66, no. 9, pp. 344–349.

15. Billaha A., Das M. K. Influence of Doping on the Performance of GaAs/AlGaAs QWIP for Long Wavelength Applications. *Opto-Electronics Review*. 2016, vol. 24, no. 1, pp. 25–33.
doi: 10.1515/oere-2016-0006

16. Nutku F., Erol A., Gunes M., Buklu L. B., Ergun Y., Arikan M. C. I–V Characterization of a Quantum Well Infrared Photodetector with Stepped and Graded Barriers. *Superlattices and Microstructures*. 2012, vol. 52, no. 3, pp. 585–593.
doi: 10.1016/j.spmi.2012.06.010

17. Yang Y., Liu H. C., Shen W. Z., Li N., Lu W., Wasilewski Z. R. Optimal Doping Density for Quantum-Well Infrared Photodetector Performance. *IEEE J. of Quantum Electronics*. 2009, vol. 45, no. 6, pp. 623–628.
doi: 10.1109/JQE.2009.2013119

18. Dudin A. L., Katsavets N. I., Krasovitsky D. M., Filaretov A. G., Chaly V. P. Standardization of Manufacturing Technologies for Matrices for Cooled Thermal Imagers: "Hot" or "Cold"? *Electronics: Science, Technology, Business*. 2022, no. 2, pp. 114–119.
doi: 10.22184/1992-4178.2022.213.2.114.119

Information about the authors

Anatoliy L. Dudin, Specialist in Physics and Technology of Semiconductor Devices (1996, Saint Petersburg Electrotechnical University), Chief Technologist of JSC "Svetlana-Rost". The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: microwave; technology of semiconductor devices; QWIP.

Address: JSC "Svetlana-Rost", 27, Engelsa Ave., St Petersburg 194156, Russia

E-mail: a.dudin@svrost.ru

<https://orcid.org/0009-0007-2005-4304>

Vasily I. Zybkov, Dr Sci. (Phys. and Math.) (2008), Professor (2018) of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: physics of semiconductor; nanoelectronics; admittance spectroscopy; diagnostics of nanoheterostructures; computer modeling.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vzubkovspb@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6830-6899>

Lana S. Bogoslovskaya, Master in Nanotechnology and Microsystem Engineering (2023, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer-technologist of JSC "Svetlana-Rost". End-to-end technologist in the QWIP direction. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: semiconductor chip manufacturing technology; QWIP.

Address: JSC "Svetlana-Rost", 27, Engelsa Ave., St Petersburg 194156, Russia

E-mail: lana.stoliarowa@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0002-9538-1055>