

Исследование влияния ширины барьера на рабочее напряжение QWIP

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

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. Спектр применения инфракрасных фотодетекторов с квантовыми ямами (QWIP) очень широк. Такие фотодетекторы являются достаточно востребованными на рынке, поэтому очень важно глубокое понимание принципа их работы.

Цель работы. Исследование влияния потенциального барьера AlGaAs, окружающего квантовые ямы GaAs, на значение рабочего напряжения смещения QWIP длинноволновой области спектра (8...10 мкм).

Материалы и методы. Для проведения эксперимента были изготовлены образцы QWIP на основе системы полупроводниковых материалов GaAs/AlGaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Фоточувствительная (активная) область структур содержала 50 квантовых ям GaAs толщиной 50 Å, разделенных барьерами AlGaAs. Квантовые ямы легировались *in situ* донорной примесью – кремнием. Длина волны максимума спектральной чувствительности всех образцов находилась в диапазоне 8...9 мкм. Варьируемым параметром являлась ширина барьера. После прохождения технологического маршрута планарной модификации на всех структурах были сняты вольт-амперные характеристики.

Результаты. Выявлено, что уменьшение толщины барьера способно сместить пик фоточувствительности в область меньших напряжений смещения при незначительном увеличении силы темнового тока.

Заключение. Исследование влияния значения приложенного напряжения смещения представляет интерес не только с научной точки зрения – результаты помогут лучше понять поведение темнового тока в QWIP, а также позволят управлять максимумом токовой чувствительности, смещая ее в область требуемых рабочих напряжений мультиплексоров.

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

Для цитирования: 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

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; принята к публикации после рецензирования 17.06.2024; опубликована онлайн 27.09.2024

Influence of Barrier Width on QWIP Operating Voltage

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

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²JSC "Svetlana-Rost", St Petersburg, Russia

✉ Lana.stoliarowa@yandex.ru

Abstract

Introduction. Quantum well infrared photodetectors (QWIP) are characterized by a wide application range. A large market demand for such photodetectors determines the importance of elucidating the principle of their operation.

Aim. To carry out a research study into the influence of the AlGaAs potential barrier surrounding GaAs quantum wells on the QWIP operating bias voltage in the long-wavelength region of the spectrum (8...10 μm).

Materials and methods. QWIP experimental samples were manufactured based on the GaAs/AlGaAs semiconductor material system using molecular beam epitaxy. The photosensitive (active) region of the structures contained 50 GaAs quantum wells with a thickness of 50 Å thick separated by AlGaAs barriers. Quantum wells were doped in situ with silicon as a donor impurity. The wavelength of the maximum spectral sensitivity of all samples ranged within 8...9 μm . The barrier width was the variable parameter. After passing the planar modification process route, the current–voltage characteristics were measured in all structures.

Results. Reduction in the barrier thickness is capable of shifting the peak of photosensitivity towards the region of lower bias voltages with a slight increase in the dark current values.

Conclusion. The study of the influence of the applied bias voltage presents both scientific and practical interest. On the one hand, the results improve the current understanding of the behavior of the dark current in QWIP. On the other, they provide the possibility of managing the maximum current sensitivity, shifting it towards the region of the required operating voltages of the multiplexers.

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

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

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.

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

Submitted 05.04.2024; accepted 17.06.2024; published online 27.09.2024

Введение. Матричные инфракрасные фотодетекторы с квантовыми ямами (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP) в последнее время привлекают все больше внимание из-за своего потенциального применения в качестве относительно недорогих и высокопроизводительных приборов приема изображения в инфракрасном (ИК) диапазоне электромагнитного спектра. QWIP-камеры длинноволнового диапазона (8...14 мкм) позволяют получать изображение в условиях плохой видимости, например сквозь облачность, дым или дождь [1]. В ИК-диапазоне можно увидеть текущую горячую вулканическую лавовую трубу, скрытую

под землей. Особенно важным может быть применение QWIP-камер в медицине, поскольку с их помощью, например, можно распознавать раковые клетки [1].

Двумя важнейшими параметрами QWIP-прибора являются темновой ток и токовая чувствительность в максимуме спектра фоточувствительности. Понимание их поведения в зависимости от различных факторов очень важно при проектировании дизайна структуры и для оптимизации QWIP.

Фоточувствительность определяет способность детектора поглощать падающее на него электромагнитное излучение – по спектру фо-

точувствительности можно определить длину волны, на которой поглощение максимально.

Токовая чувствительность, определяемая на длине волны максимума фоточувствительности, характеризует способность QWIP преобразовывать падающее излучение в электрический сигнал. В настоящий момент на российских предприятиях, занимающихся разработкой QWIP, удовлетворительным показателем является значение статической токовой чувствительности в максимуме спектра фоточувствительности от 0.15 А/Вт [2]. При этом непрерывно ведутся работы по поиску способов увеличения чувствительности фотодетекторов. Одним из распространенных способов является увеличение концентрации легирующей примеси в квантовых ямах [3], однако этот метод имеет существенный недостаток. Дело в том, что для детектирования излучения в ИК-области применяются полупроводниковые материалы с достаточно узкой запрещенной зоной, поэтому необходимым условием для успешной работы QWIP, как и для большинства других ИК-фотодетекторов, является охлаждение до низких (77 К и ниже) температур. В противоположном случае тепловой шум в устройстве будет слишком велик, а спектральная чувствительность низкой. При этих условиях чем выше уровень легирования квантовых ям,

тем больше темновой ток, протекающий через QWIP [4]. В свою очередь, темновой ток обуславливает шум и диктует рабочую температуру фотодетектора [5]. Темновой ток – это ток, протекающий через структуру независимо от того, падают на активную область фотоны или нет.

Условием работы QWIP является приложение внешнего электрического поля к активной области, чтобы добиться наклона энергетических зон и обеспечить постоянный ток через структуру. При приложении напряжения смещения темновой ток является неизбежным [6]. Таким образом, одной из важнейших задач при оптимизации параметров структуры QWIP является минимизация темнового тока.

К настоящему времени разработано несколько аналитических и численных моделей для оценки возможности управления темновым током при различных параметрах QWIP. Обзор некоторых из них представлен в [7]. Однако практика показывает, что они не могут учесть все особенности сложной полупроводниковой гетероструктуры с множественными квантовыми ямами, которой являются QWIP, и достоверно предсказать поведение темнового тока в различных условиях.

Рассмотрим подробнее некоторые из существующих механизмов возникновения темнового тока (рис. 1).

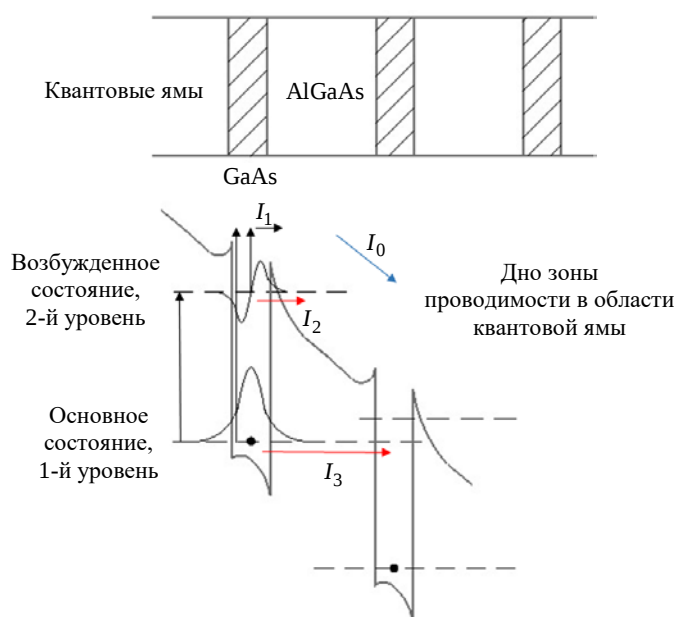


Рис. 1. Схематичное изображение активной области и фрагмента дна зоны проводимости QWIP-структуры с двумя квантово-размерными энергетическими уровнями при приложении внешнего электрического поля

Fig. 1. Schematic representation of the active region and a fragment of the conduction band bottom of a QWIP structure with two quantum-sized energy levels under an external electric field

При приложении внешнего электрического поля энергетические зоны структуры искривляются – появляется наклон. Через структуру протекает ток, который в нулевом приближении (без учета влияния квантовых ям) можно определить согласно закону Ома следующим образом:

$$I_0 = \frac{U}{R},$$

где I_0 – базовый ток, протекающий через гетероструктуру при приложении внешнего электрического поля; U – приложенное напряжение смещения; R – сопротивление гетероструктуры.

Квантовые ямы QWIP стараются выращивать таким образом, чтобы внутри существовало 2 энергетических уровня. В связи с этим дальнейшее рассмотрение будет строиться из предположения, что в энергетической структуре QWIP первый (основной) уровень располагается у дна квантовой ямы, а второй (возбужденный) – близко к вершине энергетического барьера в отсутствие приложения внешнего электрического поля.

Основная электронная плотность сосредоточена на первом (основном) уровне. Под воздействием ИК-излучения электрон может перейти с основного уровня на возбужденный уровень или выйти из квантовой ямы (рис. 1, I_1) в свободную зону. В таком случае добавочный ток возникает по механизму термоэлектронной эмиссии. Эта составляющая темнового тока очень сильно зависит от рабочей температуры фотодетектора и преобладает на относительно высоких температурах [4].

Из возбужденного состояния электрон может также туннелировать через вершину потенциального барьера в континуум за счет того, что зоны изгибаются при приложении внешнего электрического поля (рис. 1, I_2) [8, 9]. Этот вклад темнового тока в основном определяется резкостью гетерограниц при росте эпитаксиальных слоев GaAs на AlGaAs и AlGaAs на GaAs и значением напряженности электрического поля вблизи квантовой ямы.

Другой механизм квантово-механического туннелирования может возникнуть вследствие того, что наблюдается некоторое перекрытие волновых функций электронов на основных (низших) уровнях соседних квантовых ям (рис. 2). Темновой ток, протекающий за счет

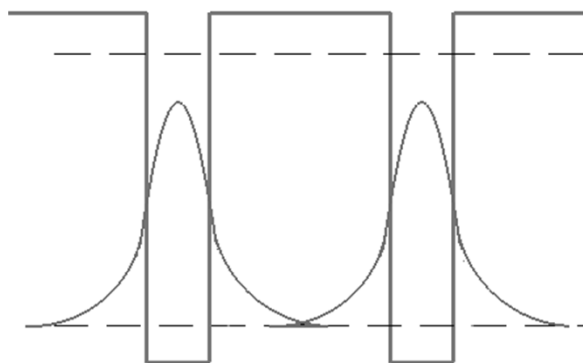


Рис. 2. Схематичное изображение перекрытия волновых функций электронов на основном уровне в структуре с несколькими квантовыми ямами

Fig. 2. Schematic representation of the overlap of electron wave functions at a level with several quantum wells

данного типа туннелирования, начинает доминировать при очень низких температурах, когда вклады темновых токов, вызванных термоэлектронной эмиссией и туннелированием с верхнего уровня квантовых ям, минимальны. Он практически не зависит от рабочей температуры, и в литературе показано, что его можно устранить, если корректно выбрать толщину барьерного слоя, разделяющего квантовые ямы [7].

Таким образом, протекающий через фотодетектор темновой ток складывается из нескольких составляющих:

$$I_{\text{темн}} = I_0 + I_1 + I_2 + I_3, \quad (1)$$

где $I_{\text{темн}}$ – суммарный протекающий через фотодетектор темновой ток; I_1 – ток, обусловленный переходом электронов в зону проводимости под воздействием фотонов с основного и возбужденного уровней; I_2 – ток, обусловленный квантово-механическим туннелированием через барьер из возбужденного состояния; I_3 – ток, обусловленный квантово-механическим туннелированием через барьер из основного состояния.

Сила протекающего через фотодетектор темнового тока существенно зависит от множества факторов, таких, как ширина квантовой ямы [10], уровень и профиль ее легирования [3, 11], а также высота барьера, его форма и степень легирования [4, 12–14]. Влияние большинства из них достаточно подробно изучено в литературе. При этом детальных исследований влияния ширины барьера на рабочие характеристики готовых изделий QWIP не проводилось.

Очевидно, что барьер должен быть достаточно толстым, чтобы предотвратить последовательное туннелирование между соседними квантовыми ямами. В [15] показано, что при ширине квантовой ямы около 5 нм туннелирование пренебрежимо мало при толщине барьеров более 20 нм.

При этом сильное увеличение ширины барьера не только экономически нецелесообразно, но и не приводит к ощутимому уменьшению темнового тока. Поэтому в большинстве публикаций ограничиваются ростом барьера до толщины 50 нм, хотя встречаются и данные об образцах с более толстыми барьерами [16].

Стремление к росту тонких барьерных слоев обусловлено кроме всего прочего экономическими соображениями, способствуя уменьшению времени ростового процесса. В перспективе серийного производства это позволяет увеличить выход продукции. Кроме того, увеличение количества квантовых ям за счет сокращения толщины барьеров при сохранении общей толщины активной области неизменной может привести к более высокой доле поглощенного излучения [4] и, соответственно, более высокой чувствительности прибора.

После того как технологический процесс изготовления QWIP завершен, рабочие матрицы монтируют на интегральные микросхемы (мультиплексоры) методом flip-chip. Это позволяет считывать сигнал, поступающий с пикселей фоточувствительной матрицы, преобразовать его для дальнейшей обработки и вывести к пользователю. Востребованность фотоприемных матриц на рынке, в числе прочего, определяется наличием конкретных мультиплексоров, на которые можно будет осуществить их последующий монтаж. Мультиплексоры различаются по рабочему напряжению, поэтому очень важно не только обеспечить определенное значение максимума токовой чувствительности, но и иметь возможность управлять напряжением, при приложении которого этот максимум достигается.

Целью описываемой работы являлось изучение степени влияния ширины барьерных слоев активной области QWIP-структуры на рабочие характеристики тестовых фотоприемников, а именно – на вид вольт-амперных характеристик (ВАХ) и на спектры статической токовой чувствительности в максимуме спектра фоточувствительности.

Материалы и методы исследования. Для проведения эксперимента было изготовлено несколько образцов QWIP на основе системы полупроводниковых материалов GaAs/AlGaAs. Эпитаксиальные слои выращивались на отечественной автоматизированной установке молекулярно-пучковой эпитаксии производства ЗАО "НТО" STE35. Фоточувствительная (активная) область структур содержала 50 квантовых ям GaAs толщиной 50 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$), разделенных барьерами AlGaAs. Квантовые ямы легировались in situ донорной примесью – кремнием. Ширина барьера являлась варьируемым параметром. Длина волны максимума спектральной чувствительности всех образцов находилась в диапазоне 8...9 мкм. Ключевые данные о структурном составе образцов представлены в таблице.

После ростового процесса эпитаксиальные структуры прошли планарную постобработку для формирования непосредственно образцов QWIP, а именно: в верхнем контактном слое с помощью плазмохимического травления GaAs были сформированы дифракционная решетка, омические контакты на основе сплава Ni, Ge, Au, а на тестовые фотоприемники были напылены индиевые контакты высотой 5...7 мкм.

По окончании технологического процесса тестовые фотоприемники были смонтированы методом flip-chip с подкристалльными платами и помещены в заливной азотный оптический криостат JANIS VPF-100. При помощи аппаратно-программного комплекса Keithley 4200 были измерены ВАХ, а также построены графики зави-

Данные образцов

Sample data

Образец	Концентрация примеси в квантовой яме, см^{-3}	Ширина барьера, Å	Ширина квантовой ямы, Å
А	$9 \cdot 10^{17}$	450	50
В	$9 \cdot 10^{17}$	300	50

симости токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения для всех образцов.

Для того чтобы построить графики зависимости токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения, необходимо осуществить следующие действия:

1. Снять спектр fotocувствительности образцов, определить значение длины волны, на которой поглощение падающего электромагнитного излучения максимально.

2. Измерить ВАХ при облучении тестового фотоприемника источником ИК-излучения и ВАХ при закрытом источнике ИК-излучения.

3. Рассчитать значение токовой чувствительности в максимуме спектра fotocувствительности по формуле

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

где S – значение токовой чувствительности; ΔI – разность между протекающими через тестовый фотоприемник токами при облучении его ИК-излучением и при отсутствии облучения на заданном напряжении смещения; J – плотность излучения, падающего на тестовый фотоприемник на заданной длине волны; A – площадь fotocувствительной поверхности тестового фотоприемника размерами 500×500 мкм.

Значение рабочего напряжения смещения оценивалось по построенным графикам зависимости токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения. В качестве рабочего выбиралось напряжение, на котором токовая чувствительность имела максимальное значение.

Результаты. На рис. 3 представлены измеренные и приведенные к единице спектры fotocувствительности образцов А и В. Максимум длины волны поглощения образца А соответствует 8535 нм, образца В – 8445 нм.

На рис. 4 представлены измеренные ВАХ образцов А и В. ВАХ имеет нелинейный характер – при приложении различных напряжений смещения темновой ток, рассчитанный по (1), начинает вносить вклад в общий ток, протекающий через гетероструктуру.

На рис. 5 представлены графики зависимости токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения образцов А и В в максимуме спектров их fotocувствительности.

Рис. 4 показывает, что на обоих образцах

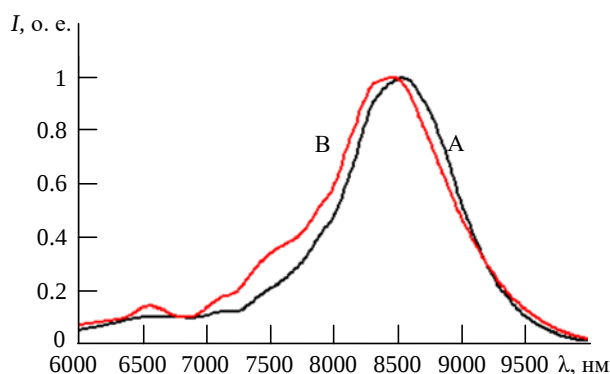


Рис. 3. Нормированные спектры fotocувствительности образцов А и В

Fig. 3. Normalized photosensitivity spectra of A and B images

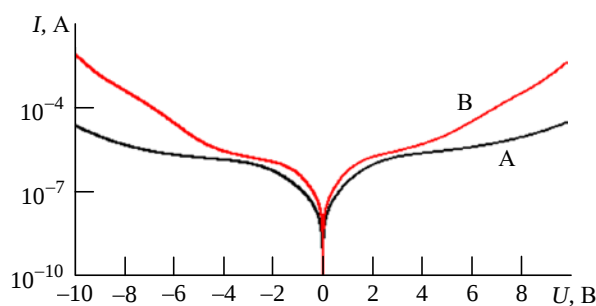


Рис. 4. ВАХ при температуре 77 К

Fig. 4. Current-voltage characteristics at a temperature of 77 K

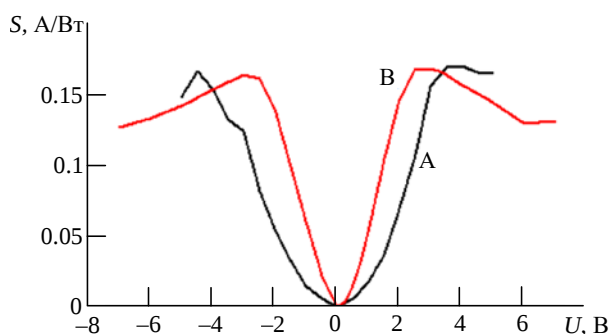


Рис. 5. Графики зависимости токовой чувствительности образцов в максимуме спектра fotocувствительности при температуре 77 К

Fig. 5. Spectra of static current sensitivity at the maximum of the photosensitivity spectrum at a temperature of 77 K

значительное увеличение темнового тока происходит на напряжениях выше 4 В. Это увеличение не является критичным, поскольку изготавливаемые QWIP-матрицы предназначены для работы на напряжениях 1.5...3 В. На рис. 4 также хорошо видно, что ветви ВАХ темнового тока образца В лежат выше по сравнению с ветвями ВАХ образца А. Однако при рабочих напряжениях различие между токами незначительно. В диапазоне напряжений 0...3 В различие между ветвями ВАХ не превышает $1.2 \cdot 10^{-6}$ А.

Данные образцов А и В демонстрируют (рис. 5), что оба образца обладают пиковой чувствительностью выше 0.15 А/Вт. Также рис. 5 показывает, что уменьшение толщины барьера сдвигает максимум чувствительности в область меньших напряжений смещения – образец А имеет максимум чувствительности при напряжении 4 В, образец В – при напряжении 2 В.

Заключение. Исследовано влияние ширины барьера на ВАХ и значение рабочего напряжения смещения QWIP.

Результаты исследования показывают, что при уменьшении ширины потенциального барьера AlGaAs наблюдается смещение пикового значения статической токовой чувствительности в область меньших напряжений смещения. При этом из представленных данных ясно вид-

но, что в диапазоне напряжений до 4 В возрастание темнового тока незначительно.

Таким образом, практическим результатом описанной работы является достижение высокой фоточувствительности на меньших значениях напряжения смещения при сохранении практически неизменных значений темнового тока на напряжениях менее 4 В.

Уменьшение времени, необходимого для роста слоев активной области QWIP-структуры, позволит увеличить эффективность технологического процесса производства либо за счет сокращения общего времени роста, требующегося для изготовления одной гетероструктуры, либо за счет возможности увеличения количества квантовых ям при сохранении общей толщины фоточувствительной области.

Список литературы

1. 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, C. A. Kukkonen, M. Levy, P. LeVan, M. A. Fauci // *Infrared Physics & Technology*. 2001. Vol. 42, № 3–5. P. 267–282. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00085-8
2. Каталог Радиоэлектронного комплекса. URL: <https://katalog-rek.ru/catalog/395/3823/> (дата обращения 23.11.2023).
3. Li S. S., Tidrow M. Z. Comparison of n- and p-type quantum well infrared photodetectors // *Detectors, Focal Plane Arrays, and Imaging Devices II*. 1998. Vol. 3553. P. 97–111. doi: 10.1117/12.318094
4. Henini M., Razeghi M. *Handbook of infrared detection technologies*. Elsevier, 2002. 532 p.
5. Intersubband transitions in quantum wells: physics and device applications / E. R. Weber, H. C. Liu, F. Capasso, R. K. Willardson. Academic press, 1999. 309 p.
6. Levine B. F. Quantum-Well Infrared Photodetectors // *J. of Applied Physics*. 1993. Vol. 74, № 8. P. R1–R81. doi: 10.1063/1.354252
7. 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, № 5–6. P. 473–480. doi: 10.1016/S1350-4495(03)00169-5
8. Quantum Well infrared photodetectors: device physics and light coupling / S. Bandara, S. Gunapala, J. Liu, J. Mumolo, E. Luong, W. Hong, D. Sengupta. Springer, 1998. P. 43–49.
9. Zubkov V. I., Ivanova Ia. V., Weyers M. Direct observation of resonant tunneling in heterostructure with a single quantum well // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 119. P. 043503. doi: 10.1063/5.0056842
10. Ultimate performance of quantum well infrared photodetectors in the tunneling regime / E. Lhuillier, I. Ribet-Mohamed, M. Tauvy, A. Nedelcu, V. Berger, E. Rosencher // *Infrared physics & technology*. 2009. Vol. 52, № 4. P. 132–137.
11. Wasilewski Z. R., Liu H. C., Buchanan M. Studies of Si segregation in GaAs using current-voltage characteristics of quantum well infrared photodetectors // *J. of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 1994. Vol. 12, № 2. P. 1273–1276. doi: 10.1116/1.587020
12. Luna E., Guzman A., Munoz E. Offset in the dark current characteristics of photovoltaic double barrier quantum well infrared photodetectors // *Infrared physics & technology*. 2005. Vol. 47, № 1–2. P. 22–28. doi: 10.1016/j.infrared.2005.02.007
13. 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
14. Characterization of the dark current of a quantum well infrared photodetector (QWIP) with selectively doped barrier layers/ Y. Uchiyama, H. Nishino, Y. Matsukura, T. Miyatake, K. Yamamoto, T. Fujii // *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII*. 2002. Vol. 4721. P. 151–158. doi: 10.1117/12.478844
15. Effect of barrier width on the performance of quantum well infrared photodetector / S. K. H. Sim, H. C. Liu, A. Shen, M. Gao, K. F. Lee, M. Buchanan, Y. Ohno, H. Ohno, E. H. Li // *Infrared Physics & Technology*. 2001. Vol. 42, № 3–5. P. 115–121. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00067-6

16. Dark currents of GaAs/AlGaAs quantum-well infrared photodetectors / N. Li, D.-Y. Xiong, X.-F. Yang, W. Lu, W.-L. Xu, C.-L. Yang, Y. Hou, Y. Fu //

Applied Physics A. 2007. Vol. 89. P. 701–705. doi: 10.1007/s00339-007-4142-2

Информация об авторах

Богословская Лана Сергеевна – аспирантка Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер АО "Светлана-Рост", сквозной технолог по направлению QWIP. Автор семи научных публикаций. 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>

Дудин Анатолий Леонидович – главный технолог 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>

References

1. 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 C. 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, no. 3–5, pp. 267–282. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00085-8

2. Radioelectronic Complex Catalog. Available at: <https://katalog-rek.ru/catalog/395/3823/> (accessed 23.11.2023).

3. Li S. S., Tidrow M. Z. Comparison of n- and p-Type Quantum Well Infrared Photodetectors. *Detectors, Focal Plane Arrays, and Imaging Devices II*. 1998, vol. 3553, pp. 97–111. doi: 10.1117/12.318094

4. Henini M., Razeghi M. *Handbook of Infrared Detection Technologies*. Elsevier, 2002, 532 p.

5. Weber E. R., Liu H. C., Capasso F., Willardson R. K. *Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Device Applications*. Academic Press, 1999, 309 p.

6. Levine B. F. Quantum-Well Infrared Photodetectors. *J. of Applied Physics*. 1993, vol. 74, no. 8, pp. R1–R81. doi: 10.1063/1.354252

7. 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, no. 5–6, pp. 473–480. doi: 10.1016/S1350-4495(03)00169-5

8. Bandara S., Gunapala S., Liu J., Mumolo J., Luong E., Hong W., Sengupta D. Quantum Well Infrared

Photodetectors: Device Physics and Light Coupling. Springer, 1998, pp. 43–49.

9. Zubkov V. I., Ivanova Ia. V., Weyers M. Direct Observation of Resonant Tunneling in Heterostructure with a Single Quantum Well. *Appl. Phys. Lett.* 2021, vol. 119, p. 043503. doi: 10.1063/5.0056842

10. Lhuillier E., Ribet-Mohamed I., Tauvy M., Nedelcu A., Berger V., Rosencher E. Ultimate Performance of Quantum Well Infrared Photodetectors in the Tunneling Regime. *Infrared Physics & Technology*. 2009, vol. 52, no. 4, pp. 132–137.

11. Wasilewski Z. R., Liu H. C., Buchanan M. Studies of Si Segregation in GaAs Using Current–Voltage Characteristics of Quantum Well Infrared Photodetectors. *J. of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 1994, vol. 12, no. 2, pp. 1273–1276. doi: 10.1116/1.587020

12. Luna E., Guzman A., Munoz E. Offset in the Dark Current Characteristics of Photovoltaic Double Barrier Quantum Well Infrared Photodetectors. *Infrared Physics & Technology*. 2005, vol. 47, no. 1–2, pp. 22–28. doi: 10.1016/j.infrared.2005.02.007

13. 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

14. Uchiyama Y., Nishino H., Matsukura Y.,

Miyatake T., Yamamoto K., Fujii T. Characterization of the Dark Current of a Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) with Selectively Doped Barrier Layers. Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII. 2002, vol. 4721, pp. 151–158. doi: 10.1117/12.478844

15. Sim S. K. H., Liu H. C., Shen A., Gao M., Lee K. F., Buchanan M., Ohno Y., Ohno H., Li E. H. Effect of Barrier Width on the Performance of Quantum Well Infrared Photodetector. Infrared Physics & Technology. 2001, vol. 42, no. 3–5, pp. 115–121. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00067-6

16. Li N., Xiong D.-Y., Yang X.-F., Lu W., Xu W.-L., Yang C.-L., Hou Y., Fu Y. Dark Currents of GaAs/AlGaAs Quantum-Well Infrared Photodetectors. Applied Physics A. 2007, vol. 89, pp. 701–705. doi: 10.1007/s00339-007-4142-2

Information about the authors

Lana S. Bogoslovskaya – postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer of JSC "Svetlana-Rost". End-to-end technologist in the QWIP direction. The author of 7 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>

Anatoliy L. Dudin – 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>
