

## Влияние способа легирования на вольт-амперные характеристики инфракрасных фотодетекторов с квантовыми ямами на основе GaAs/AlGaAs-гетероструктур

А. Л. Дудин<sup>2</sup>, И. В. Коган<sup>2</sup>, Л. С. Богословская<sup>1,2✉</sup>, В. И. Зубков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> АО «Светлана-Рост», Санкт-Петербург, Россия

✉ [iana.stoliarowa@yandex.ru](mailto:iana.stoliarowa@yandex.ru)

**Аннотация.** Исследовалось влияние способа легирования квантовых ям на вид вольт-амперных характеристик охлаждаемых инфракрасных фотодетекторов на основе GaAs/AlGaAs-гетероструктур, чувствительных в длинноволновой области спектра 8...10 мкм. Структуры выращивались на отечественной установке молекулярно-пучковой эпитаксии. Легирование осуществлялось посредством открытия затворов перед тиглем с кремнием во время роста квантовых ям. Варьируемым параметром было положение легированной области внутри квантовой ямы. По окончании технологического процесса на всех образцах были сняты вольт-амперные характеристики. Выявлено существенное влияние положения легированной области в квантовой яме на вид вольт-амперных характеристик QWIP, обусловленное сегрегацией легирующей примеси (Si) в барьерные слои.

**Ключевые слова:** инфракрасные фотодетекторы с квантовыми ямами, сегрегация легирующей примеси, вольт-амперные характеристики

**Для цитирования:** Влияние способа легирования на вольт-амперные характеристики инфракрасных фотодетекторов с квантовыми ямами на основе GaAs/AlGaAs-гетероструктур / А. Л. Дудин, И. В. Коган, Л. С. Богословская, В. И. Зубков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 2. С. 61–68. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-61-68.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Авторы благодарят коллег в АО «Светлана-Рост» за подготовку образцов и осуществление возможности проведения необходимых измерений в сжатые сроки.

Original article

## Effect of Doping Method on I-V Characteristics of Infrared Photodetectors with Quantum Wells Based on GaAs/AlGaAs Heterostructures

A. L. Dudin<sup>2</sup>, I. V. Kogan<sup>2</sup>, L. S. Bogoslovskaya<sup>1,2✉</sup>, V. I. Zubkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> JSC «Svetlana-Rost», Saint Petersburg, Russia

✉ [iana.stoliarowa@yandex.ru](mailto:iana.stoliarowa@yandex.ru)

**Abstract.** The aim of this work is to study the impact of the method of doping quantum wells on the shape of current-voltage characteristics of cooled infrared photodetectors based on GaAs/AlGaAs heterostructures, sensitive in the spectral region 8...10  $\mu\text{m}$ . The structures were grown in a domestic molecular beam epitaxy setup. The doping was carried out by opening shutters in front of the silicon during the growth of quantum wells. The variable parameter was the position of the doped region inside the quantum well. At the end of the technological process, current-voltage characteristics were measured on all samples. A significant influence was revealed of the position of the doped region in the quantum well on the type of current-voltage characteristics, due to the segregation of the dopant (Si) into the barrier layers.

**Keywords:** quantum well infrared photodetectors, dopant segregation, current-voltage characteristics

**For citation:** Effect of Doping Method on I-V Characteristics of Infrared Photodetectors with Quantum Wells Based on GaAs/AlGaAs Heterostructures / A. L. Dudin, I. V. Kogan, L. S. Bogoslovskaya, V. I. Zubkov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 61–68. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-61-68.

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

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

Матричные фотодетекторы с квантовыми ямами (далее – QWIP) на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs наряду с традиционными фотодетекторами на основе твердых растворов CdHgTe успешно применяются в инфракрасной технике длинноволнового диапазона. Технология GaAs – более зрелая на сегодняшний день и, главное, устойчиво воспроизводимая, что обеспечивает арсенид-галлиевым приборам, в частности QWIP, неутрачивающий интерес со стороны коммерческих предприятий, к которым относится акционерное общество «Светлана-Рост» [1]. В то же время QWIP – это сложный прибор, в основе которого лежат квантово-размерные эффекты. В связи с этим на эффективность его работы влияет большое количество факторов, не все из которых до конца изучены.

QWIP представляет собой фоточувствительную матрицу, соединенную со схемой считывания и вывода сигнала (мультиплексором или подкристалльной платой).

Фоточувствительная матрица состоит из двух структурных элементов: активной – фоточувствительной – области и двух слоев высоколегированного GaAs, которые расположены с двух сторон от нее

(рис. 1). Необходимость наличия этих слоев обусловлена тем, что уровень Ферми в чистом GaAs лежит вблизи середины запрещенной зоны, поэтому невозможно подобрать металл с соответствующей работой выхода, чтобы впоследствии создать омический контакт к нелегированному GaAs.

Активная область представляет собой массив квантовых ям (обычно период выбирается равным 50 [1]). В качестве узкозонного материала в данном случае выбирается GaAs, а в качестве широкозонного материала для барьерного слоя – AlGaAs.

В процессе планарной модификации поверхности на матрице методом плазмохимического травления создаются отдельные пиксели, с которых будет сниматься сигнал. Плазмохимическое вытравливание дифракционной решетки в верхнем контактном слое обусловлено квантово-механическими правилами отбора: в QWIP, легированных донорной примесью (далее – *n*-QWIP), свет, падающий на активную область по нормали, не может поглощаться в квантовых ямах. В связи с этим требуется дополнительный структурный элемент, который будет отклонять падающее электромагнитное излучение [2]. Существует не-

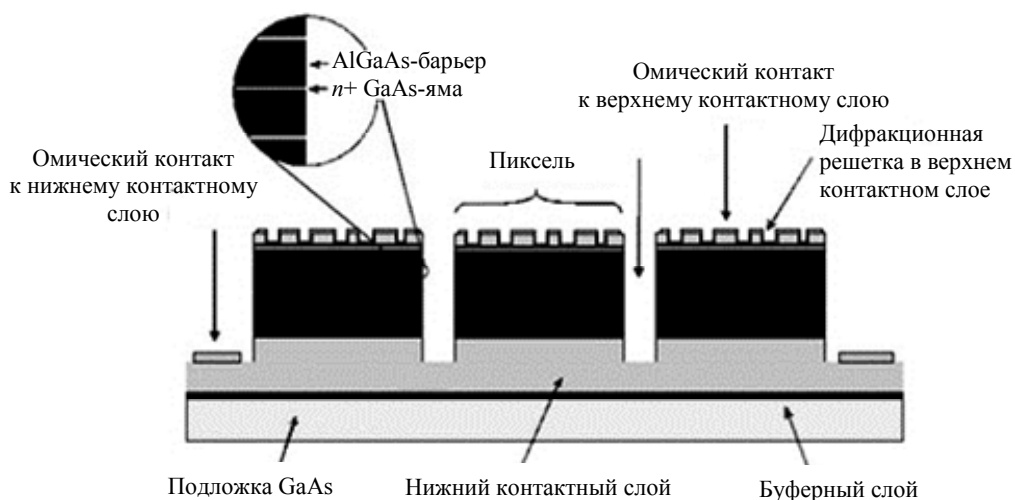


Рис. 1. Структура фоточувствительной матрицы QWIP  
Fig. 1. Structure of the *n*-QWIP photosensitive matrix

сколько подходов к осуществлению отклонения падающего излучения от нормали: формирование дифракционной решетки, наклонных боковых стенок пикселей, заведение излучения в подложку под углом и др. [3]. В конструкции QWIP, использованной в рамках данной статьи, применялась именно дифракционная решетка.

Принцип работы QWIP основан на поглощении носителем заряда фотона и его переходе на верхний уровень квантовой ямы, откуда его уносит во внешнюю цепь приложенное электрическое поле (рис. 2). Падающее через подложку на активную область QWIP электромагнитное излучение обозначено как  $hc/\lambda$ , где  $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – постоянная Планка;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения.

Даже в нелегированной квантовой яме содержится определенное количество носителей заряда, поскольку ее энергетические уровни находятся существенно ниже дна зоны проводимости и выше потолка валентной зоны барьеров [4]. Однако их концентрация обычно недостаточна для получения хорошего сигнала, поэтому ямы QWIP должны быть дополнительно легированы либо акцепторной [5], либо донорной примесью [2].

При легировании во время процесса молекулярно-пучковой эпитаксии существует ряд усло-

вий, которые необходимо принимать во внимание при выборе легирующей примеси:

- высокая растворимость примеси;
- отсутствие выделения второй фазы;
- водородоподобность (иными словами, примесь должна быть мелкой);
- низкий коэффициент диффузии примеси при температуре эпитаксиального роста и другие.

Наиболее часто при росте QWIP используется акцепторная примесь Ве. Однако из-за большей эффективной массы дырок по сравнению с электронами и их меньшей подвижности коэффициент адсорбции и фоточувствительность [2] QWIP, легированных акцепторной примесью (далее – *p*-QWIP), оказывается ниже, чем у *n*-QWIP. Это объясняет, почему основной интерес исследователей направлен на изучение и улучшение характеристик именно *n*-QWIP. В качестве донорных примесей с разной степенью успеха используются Ge, Sn, PbS и др., однако Si служит наиболее распространенной легирующей примесью при производстве *n*-QWIP.

Однако хотя легирование квантовых ям увеличивает фоточувствительность прибора, оно влечет за собой и увеличение темнового тока. Замечено, что в ряде случаев ВАХ оказывается несимметричной [6] – значения темнового тока прямой ветви ВАХ (т. е. при приложении положи-

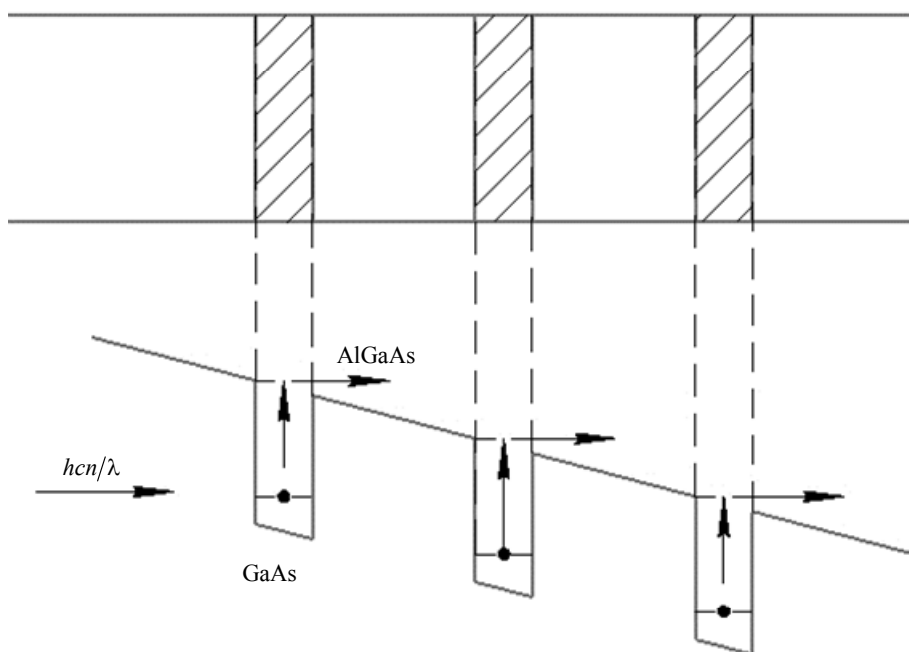


Рис. 2. Зона проводимости активной области QWIP с двумя квантово-размерными энергетическими уровнями при приложении внешнего электрического поля  
Fig. 2. Conduction band of a QWIP active region with two quantum-sized energy levels when an external electric field is applied

тельного напряжения смещения к верхнему контактному слою) лежат гораздо выше обратной ветви. Уменьшение значения темнового тока при прямом смещении при сохранении оптимальных параметров фоточувствительности составляет одну из основных задач при производстве QWIP.

Многие исследователи объясняют несимметричность ВАХ асимметрией интерфейсов, поскольку на процесс протекания тока очень сильно влияет форма потенциального барьера [7]. Возникновение асимметрии гетерограниц GaAs/AlGaAs и AlGaAs/GaAs объясняют небольшим различием их шероховатостей; различием периодов решеток GaAs и AlGaAs: в одном случае будет наблюдаться растяжение, а в другом – сжатие кристаллической решетки; различием концентраций включений различных примесей (в частности, кислорода и углерода) у разных интерфейсов [8]; диффузией галлия [6] и др. Некоторые исследователи это связывают с распространением легирующей примеси по ходу роста во время ростового процесса. В ряде работ при  $\delta$ -легировании квантовых ям кремнием данный процесс назван сегрегацией [7], [9].

В настоящей статье исследуется влияние способа легирования квантовых ям QWIP кремнием на внешний вид ВАХ, снимаемых по окончании технологического процесса.

**Подготовка образцов.** Для проведения эксперимента было выращено 4 образца *n*-QWIP. Активная область гетероструктур QWIP содержала 50 квантовых ям GaAs толщиной 50 Å, легированных кремнием, окруженных 51 барьером AlGaAs толщиной 300 Å.

Для обеспечения контакта сверху и снизу активной области были выращены относительно толстые слои GaAs, легированные кремнием до концентрации  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Толщины слоев равнялись 0.7 и 1.5 мкм соответственно. Омический контакт создавался из сплава на основе Ni-Ge-Au.

Эпитаксиальные слои выращивались на отечественной автоматизированной установке молекулярно-пучковой эпитаксии производства ЗАО «НТО» STE35.

Во время эпитаксиального роста потоки испаряемых веществ контролировались автоматически открытием и закрытием заслонок перед тиглями с испаряемыми веществами.

**Ростовой процесс.** Процесс роста QWIP-структуры в автоматизированной установке моле-

кулярно-пучковой эпитаксии проходил по заранее прописанному алгоритму (рецепту). Во время эпитаксиального роста потоки испаряемых веществ контролировались с помощью открытия и закрытия автоматических заслонок перед тиглями с испаряемыми веществами.

Стандартный рецепт роста активной области GaAs/AlGaAs можно представить в виде следующей очередности операций (заслонки перед тиглями с Ga и As остаются открытыми в течение всего процесса):

1. Открытие заслонки перед тиглем с Al – начало роста первого барьерного слоя.
2. Закрытие заслонки перед тиглем с Al – начало роста квантовой ямы.
3. Открытие заслонки перед тиглем с легирующей примесью.
4. Закрытие заслонки перед тиглем с легирующей примесью.
5. Открытие заслонки перед тиглем с Al – начало роста нового барьера.

Далее следует повтор указанной последовательности заданное число раз – согласно необходимому количеству квантовых ям в активной области. Перед каждым действием в рецепте прописывается точное время, когда данное действие должно быть совершено.

Образцы разделены на две серии. Первая серия (образцы А, В) выращена для проверки предположения о том, что на вид ВАХ (асимметрию) влияет именно сегрегация кремния. Вторая серия (образцы С, D) выращена для подтверждения данных первой серии (их воспроизводимости), а также с целью установить размер области сегрегации легирующей примеси во время роста на заданной температуре ростового процесса.

Образец А выращен в условиях «симметричного» легирования – время, прошедшее с момента закрытия заслонки перед тиглем с Al до открытия заслонки перед тиглем с Si, равнялось времени, прошедшему с момента закрытия заслонки с Si до открытия заслонки перед тиглем с Al. Схематично структура легированной области в квантовой яме представлена на рис. 3.

Образец В выращен в условиях, когда легирование смещено к началу роста квантовой ямы (рис. 4).

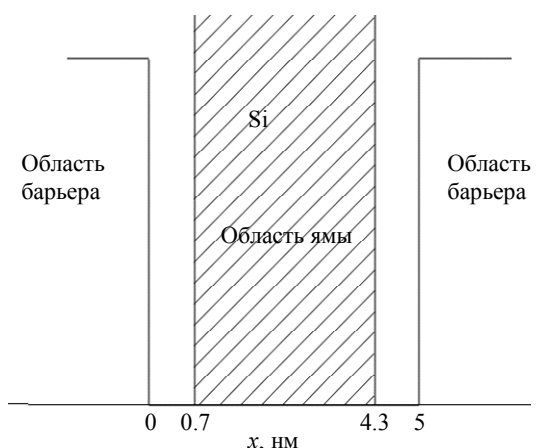


Рис. 3. Схематичное изображение положения легированной области в квантовой яме при «симметричном» легировании  
 Fig. 3. Schematic representation of the position of the doped region in a quantum well with «symmetric» doping

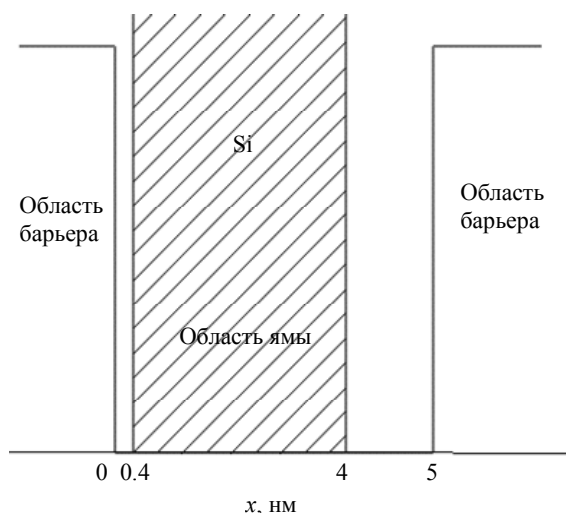


Рис. 4. Схематичное изображение положения легированной области в квантовой яме при «смещенном» легировании  
 Fig. 4. Schematic representation of the position of the doped region in a quantum well with «shifted» doping

Образец С выращен в условиях, идентичных условиям роста образца В.

Образец D выращен в условиях еще более асимметричного легирования для подтверждения достигнутого результата.

Данные всех образцов сведены в табл. 1.

Табл. 1. Данные образцов  
 Tab. 1. Sample data

Образец	Уровень легирования в квантовой яме, $\text{см}^{-3}$	Координата начала легирования квантовой ямы, нм	Координата окончания легирования квантовой ямы, нм	Толщина легированной области, нм
A	$9 \cdot 10^{17}$	0.7	4.3	3.6
B		0.4	4.0	
C		0.4	4.0	
D	$1.8 \cdot 10^{18}$	0.4	2.2	1.8

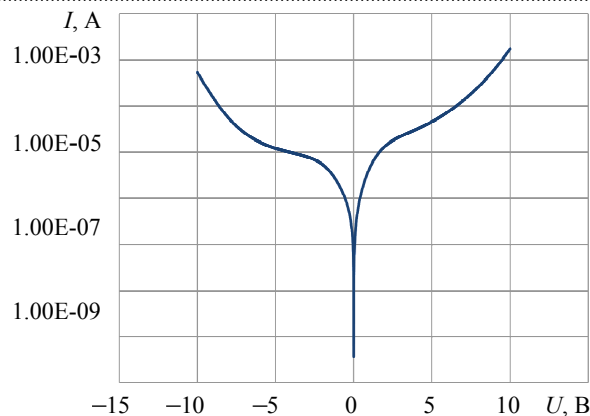


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики образца А при температуре 77 К. По вертикали приведены значения темнового тока, по горизонтали – значения приложенного напряжения смещения  
 Fig. 5. Current-voltage characteristics of sample A at a temperature of 77 K. The values of the dark current are shown vertically, and the values of the applied bias voltage are shown horizontally

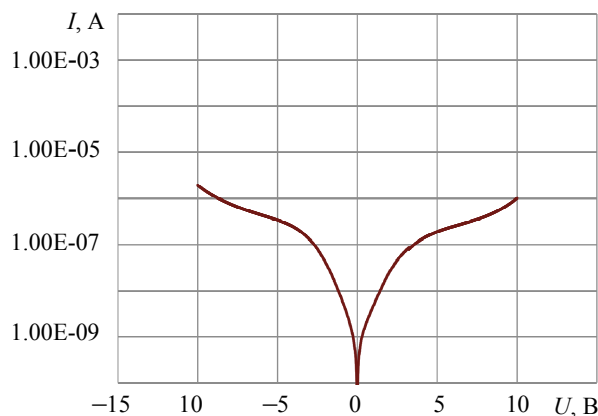


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики образца В при температуре 77 К. По вертикали приведены значения темнового тока, по горизонтали – значения приложенного напряжения смещения  
 Fig. 6. Current-voltage characteristics of sample B at a temperature of 77 K. The values of the dark current are shown vertically, and the values of the applied bias voltage are shown horizontally

По окончании технологического процесса на всех образцах были измерены вольт-амперные характеристики. Для этого тестовые фотоприемники были смонтированы методом flip-chip к подкристалльным платам и помещены в криостат. Измерения проводились при помощи аппаратно-программного комплекса Keithley 4200. Измеренные ВАХ представлены на рис. 5–6.

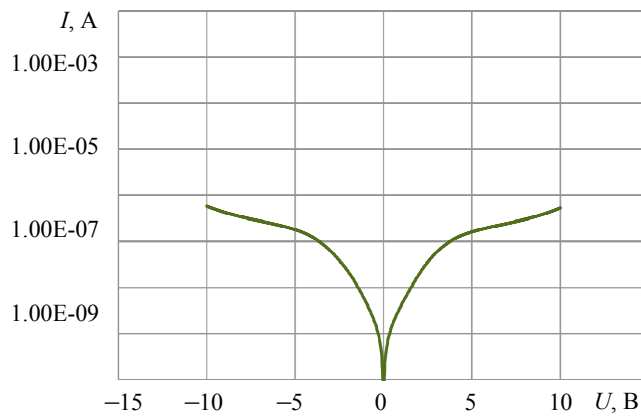


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики образца С при температуре 77 К. По вертикали приведены значения темного тока, по горизонтали – значения приложенного напряжения смещения

Fig. 7. Current-voltage characteristics of sample C at a temperature of 77 K. The values of the dark current are shown vertically, and the values of the applied bias voltage are shown horizontally

**Обсуждение результатов.** Из рис. 4, 5 видно, что образец В имеет гораздо более симметричную ВАХ по сравнению с образцом А. Из рис. 7, 8, в свою очередь, видно, что при большем смещении области легирования ВАХ остается симметричной. Также рис. 5–8 иллюстрируют, что дальнейший сдвиг легирующей примеси не влияет на симметричность ВАХ.

Выравнивание ВАХ можно объяснить следующим образом. Во время сегрегации кремний попадает в барьерные слои, вызывая снижение потенциального барьера у гетерограницы GaAs/AlGaAs по аналогии с тем, как это происходит во время  $\delta$ -легирования в [7]. Таким образом создаются благоприятные условия для протекания темного тока через данную гетерограницу. Это объясняет, почему прямая ветвь ВАХ образца А лежит выше обратной ветви на рис. 5. При смещении легированной области от гетерограницы GaAs/AlGaAs кремний, несмотря на сегрегацию, перестает попадать в барьерные слои и уменьшать значение потенциального барьера. Таким образом, ВАХ становится симметричной, что можно наблюдать на ВАХ образцов В, С и D.

При этом важно отметить, что дальнейшее смещение не оказывает влияния на вид ВАХ – образцы С и D обладают в равной степени симметричными ВАХ (рис. 7, 8). Из этого можно заключить, что сегрегация происходит в слое толщиной менее 1 нм.

Наблюдаемое на рис. 5–8 различие абсолютных значений темного тока образцов связано с различием положения уровня Ферми относительно зоны проводимости барьера: образцы предназначены для работы на разных длинах волн.

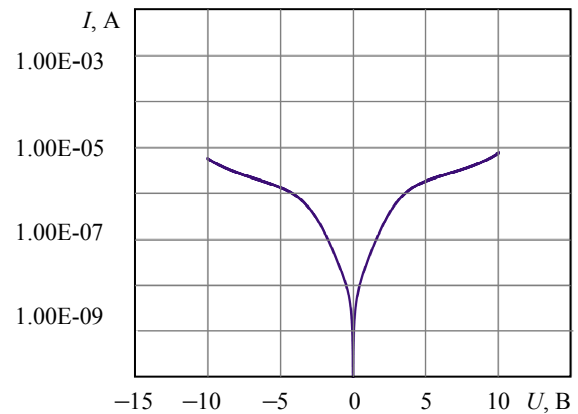


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики образца D при температуре 77 К. По вертикали приведены значения темного тока, по горизонтали – значения приложенного напряжения смещения

Fig. 8. Current-voltage characteristics of sample D at a temperature of 77 K. The values of the dark current are shown vertically, and the values of the applied bias voltage are shown horizontally

**Выводы и заключение.** Проведено исследование влияния способа легирования квантовых ям QWIP кремнием на вид снимаемых в конце технологического процесса ВАХ.

Установлено, что наблюдаемая асимметрия ВАХ вызвана процессом распространения легирующей примеси по ходу роста во время ростового процесса. Ее проникновение в барьерные слои вызывает уменьшение потенциального барьера у одной из гетерограниц (GaAs/AlGaAs), т. е. благоприятные условия для протекания темного тока при приложении положительного потенциала к верхнему контактному слою.

Сдвиг легированной области от гетерограницы GaAs/AlGaAs приводит к тому, что кремний перестает попадать в барьерные слои и искажать потенциальный барьер. Симметричность потенциального барьера влечет за собой симметричность ВАХ.

Образцы С и D указывают на воспроизводимость достигнутого результата. Также отсутствие видимой разницы между ВАХ образцов С и D показывает, что распространение кремния во время роста происходит в слое толщиной менее 1 нм. Этим обусловлено отсутствие необходимости сильного смещения легированной области относительно гетерограницы GaAs/AlGaAs.

Асимметрия ВАХ – большие значения темного тока при приложении положительного напряжения смещения – снижает качество работы QWIP. В результате проведенного исследования получены данные об эффективном методе уменьшения значений темного тока в QWIP, квантовые ямы которых легируются кремнием.

### Список литературы

1. Широкоформатные QWIP матрицы, фоточувствительные в спектральных диапазонах  $8\div 10$  и  $3\div 5$  мкм / Н. А. Андрианов, А. Л. Дудин, Н. И. Кацавец, С. В. Кокин, В. П. Чалый, И. В. Шуков // Тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. СПб.: АО «НПО „Орион“», 2016. С. 30–32.
2. 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. C. 97–111.
3. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays // J. of Appl. physics. 2009. Vol. 105, no. 9. P. 091101–091101-44.
4. Determination of band offsets in strained InGaAs/GaAs quantum wells by C-V-profiling and Schrödinger-Poisson self-consistent simulation / V. I. Zubkov, M. A. Melnik, A. V. Solomonov, E. O. Tsvelev, F. Bugge, M. Weyers, G. Tränkle // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70, no. 7. P. 075312 (1-8).
5. Integration of *n*-type and *p*-type quantum-well infrared photodetectors for sequential multicolor operation / E. Dupont, M. Gao, Z. Wasilewski, H. C. Liu // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 78, no. 14. P. 2067–2069.
6. The asymmetry in the characteristics of GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors / N. Li, L. Fu, Y. C. Chan, W. Lu, S. C. Shen // J. of Crystal Growth. 2001. Vol. 222, no. 4. P. 786–790.
7. Segregation of Si  $\delta$  doping in GaAs/AlGaAs quantum wells and the cause of the asymmetry in the current-voltage characteristics of intersubband infrared detectors / H. C. Liu, Z. R. Wasilewski, M. Buchanan, H. Chu // Appl. Phys. Lett. 1993. Vol. 63, no. 6. P. 761–763.
8. Asymmetric dark current in quantum well infrared photodetectors / K. L. Tsai, C. P. Lee, K. H. Chang, D. C. Liu // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 64, no. 18. P. 2436–2438.
9. 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 Sci. & Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 1994. Vol. 12, no. 2. P. 1273–1276.

### Информация об авторах

**Дудин Анатолий Леонидович** – заместитель генерального директора по производству и технологическим разработкам. АО «Светлана-Рост», проспект Энгельса, 27, корп. АД, Санкт-Петербург, 194156, Россия.  
E-mail: a.dudin@svrost.ru

**Коган Илья Владимирович** – старший инженер-технолог. АО «Светлана-Рост», проспект Энгельса, 27, корп. АД, Санкт-Петербург, 194156, Россия.  
E-mail: i.kogan@svrost.ru

**Богословская Лана Сергеевна** – аспирант СПбГЭТУ «ЛЭТИ», инженер АО «Светлана-Рост». проспект Энгельса, 27, корп. АД, Санкт-Петербург, 194156, Россия.  
E-mail: lana.stoliarowa@yandex.ru

**Зубков Василий Иванович** – д-р физ.-мат. наук, профессор каф. физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».  
E-mail: vzubkovspb@mail.ru

### References

1. Shirokoformatnye QWIP matricy, fotochuvstvitel'nye v spektral'nyh diapazonah  $8\div 10$  i  $3\div 5$  mkm / N. A. Andrianov, A. L. Dudin, N. I. Kacavec, S. V. Kokin, V. P. Chalyj, I. V. Shukov // Tr. XXIV Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. po fotojelektronike i priboram nochnogo videnija. SPb.: AO «NPO „Orion“», 2016. S. 30–32. (In Russ.).
2. 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. C. 97–111.
3. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays // J. of Appl. Phys. 2009. Vol. 105, no. 9. P. 091101–091101-44.
4. Determination of band offsets in strained InGaAs/GaAs quantum wells by C-V-profiling and Schrödinger-Poisson self-consistent simulation / V. I. Zubkov, M. A. Melnik, A. V. Solomonov, E. O. Tsvelev, F. Bugge, M. Weyers, G. Tränkle // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70, no. 7. P. 075312 (1-8).
5. Integration of *n*-type and *p*-type quantum-well infrared photodetectors for sequential multicolor operation / E. Dupont, M. Gao, Z. Wasilewski, H. C. Liu // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 78, no. 14. P. 2067–2069.
6. The asymmetry in the characteristics of GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors / N. Li, L. Fu, Y. C. Chan, W. Lu, S. C. Shen // J. of Crystal Growth. 2001. Vol. 222, no. 4. P. 786–790.
7. Segregation of Si  $\delta$  doping in GaAs/AlGaAs quantum wells and the cause of the asymmetry in the current-voltage characteristics of intersubband infrared detectors /

H. C. Liu, Z. R. Wasilewski, M. Buchanan, H. Chu // Appl. Phys. Lett. 1993. Vol. 63, no. 6. P. 761–763.

8. Asymmetric dark current in quantum well infrared photodetectors / K. L. Tsai, C. P. Lee, K. H. Chang, D. C. Liu // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 64, no. 18. P. 2436–2438.

9. 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 Sci. & Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 1994. Vol. 12, no. 2. P. 1273–1276.

#### Information about the authors

**Anatoliy L. Dudin** – Deputy General Director for Production and Technological Development of JSC «Svetlana-Rost», Engelsa Av., 27, build. AD, St. Petersburg, 194156, Russia.

E-mail: a.dudin@svrost.ru

**Ilya V. Kogan** – senior process engineer of JSC «Svetlana-Rost», Engelsa Av., 27, build. AD, St. Petersburg, 194156, Russia.

E-mail: i.kogan@svrost.ru

**Lana S. Bogoslovskaya** – graduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer of JSC «Svetlana-Rost», Engelsa Av., 27, build. AD, St. Petersburg, 194156, Russia.

E-mail: lana.stoliarowa@yandex.ru

**Vasiliy I. Zybkov** – Dr Sci. (Phys. and Math.), Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vzubkovspb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.10.2023; принята к публикации после рецензирования 28.11.2023; опубликована онлайн 26.02.2024.

Submitted 16.10.2023; accepted 28.11.2023; published online 26.02.2024.

---