

# Гетеропереходные низкобарьерные GaAs-диоды с улучшенной обратной вольт-амперной характеристикой

© И.В. Юнусов<sup>+,\*</sup>, В.А. Кагадей<sup>+</sup>, А.Ю. Фазлеева<sup>+</sup>, В.С. Арыков<sup>+</sup>

<sup>+</sup> АО „Научно-производственная фирма «Микран»“,  
634041 Томск, Россия

<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
634050 Томск, Россия

E-mail: yunusov@micran.ru

(Получена 9 февраля 2016 г. Принята к печати 15 февраля 2016 г.)

Предложена и реализована конструкция полупроводниковой эпитаксиальной гетероструктуры низкобарьерного диода, позволяющая существенно снизить плотность обратного тока диода без ухудшения его остальных важнейших параметров. Улучшение параметров обратной ветви вольт-амперной характеристики достигнуто за счет введения в гомоструктуру гетеропереходов, что позволило сформировать близкий к оптимальному потенциальный рельеф в объеме полупроводника. Приведены результаты теоретических расчетов с использованием TCAD Synopsys, а также сравнительные экспериментальные вольт-амперные характеристики диодов, изготовленных на основе гомо- и гетероструктур. Существенное снижение обратного тока показано на примере диодов с высотой барьера 0.2 и 0.17 В.

## 1. Введение

В современной технике сверхвысоких частот (СВЧ) для измерения мощности и преобразования частоты электрического сигнала, наряду с диодами Шоттки на основе кремния и арсенида галлия, широко применяют низкобарьерные GaAs-диоды на основе полупроводниковых переходов (НДПП) [1,2]. Диоды данного типа известны также как планарно-легированные диоды [3]. НДПП обладает высоким быстродействием и позволяет детектировать входной СВЧ сигнал в широком динамическом диапазоне (от единиц нановатт до сотен милливатт) без подачи дополнительного внешнего смещения на диод. Возможность достижения низкой емкости перехода (до десятков и единиц фемтофарад) делает НДПП оптимальным прибором для применения в качестве детектирующего элемента в сверхширокополосных измерителях мощности СВЧ сигнала [4].

Наряду с известными преимуществами [1], GaAs-НДПП обладает характерными недостатками, среди которых высокий обратный ток в большей части рабочего диапазона обратного напряжения. К следствиям указанного недостатка относятся уменьшение чувствительности диода, снижение максимально допустимого уровня входной мощности по причине разогрева диода, а также ухудшение стабильности характеристик НДПП в рабочих диапазонах температуры окружающей среды и входной СВЧ мощности.

Известные работы, направленные на улучшение характеристик НДПП, концентрируются на оптимизации конструкции классической гомоэпитаксиальной GaAs-структуры, заключающейся в подборе толщин и концентрации легирующих примесей в слоях [2]. Как правило, такая оптимизация направлена на улучшение прямой вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода и не приводит к улучшению параметров обратной ветви ВАХ.

Вместе с тем улучшение характеристик НДПП за счет снижения обратного тока актуально для ряда применений, в которых требуется эффективное функционирование диода одновременно в широких динамическом и частотном диапазонах, т. е. для наиболее высокочастотных детекторных НДПП. Конструкция таких диодов должна обеспечивать низкую емкость перехода и оптимальное дифференциальное сопротивление диода на видеочастоте, равное 2–4 кОм. Совокупность указанных требований вынуждает использовать для изготовления НДПП гомоэпитаксиальные полупроводниковые структуры с пониженным потенциальным барьером ( $< 0.23$  В), что приводит к существенно повышенному обратному току диодов.

Классическая гомоэпитаксиальная GaAs-структура, предложенная в 1980-х годах [3] и используемая по настоящее время для изготовления НДПП, не позволяет уменьшить обратный ток диода только за счет оптимизации параметров ее слоев. Данный факт объясняется особенностями конструкции и поведения встроенного потенциального барьера, сформированного исключительно электронно-дырочными переходами в объеме гомоэпитаксиальной структуры. В то же время гетероструктурная инженерия предоставляет дополнительные возможности по управлению транспортом носителей заряда посредством формирования необходимого потенциального рельефа в объеме полупроводника [5] и таким образом обеспечивает улучшение характеристик различных приборов. Ранее нами было предложено использовать гетеропереход для улучшения свойств НДПП [6,7].

Настоящая работа посвящена описанию метода снижения обратного тока GaAs-НДПП посредством формирования встроенного потенциального барьера оптимальной формы с помощью гомо- и гетеропереходов в эпитаксиальной структуре диода, а также рассмотрению физических механизмов, ответственных за наблюдаемые явления.

## 2. Методика исследования

### 2.1. Методика теоретического исследования

Теоретическое исследование электрических характеристик НДПП проводилось с использованием системы приборно-технологического моделирования TCAD Synopsys [8]. Для исследования была создана двумерная модель диода, позволяющая задавать геометрические размеры, параметры материала и уровень легирования полупроводниковых слоев. В созданной модели были использованы идеальные омические контакты металл/полупроводник для анода и катода диода.

При численном расчете ВАХ НДПП и распределения электростатического потенциала были использованы встроенные в TCAD Synopsys математические модели основных физических процессов транспорта носителей заряда.

В процессе расчета проводилась оптимизация толщины, химического и мольного состава, а также уровня легирования слоев полупроводниковой структуры. Оптимизация проводилась при обязательном учете условия постоянства заданной высоты потенциального барьера. Высота потенциального барьера оценивалась косвенно по величине дифференциального сопротивления модели диода в нулевой точке ВАХ. В качестве критерия оптимизации полупроводниковой структуры было установлено условие минимальной плотности обратного тока при величине обратного напряжения 4 В.

Корректность созданной модели диода проверялась путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными.

### 2.2. Методика экспериментального исследования

НДПП изготавливались на основе полупроводниковых структур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Конструкция структур определялась посредством исследования и оптимизации параметров диодов в системе TCAD Synopsys.

Технологический маршрут изготовления НДПП описан в [7] и включал в себя следующие блоки: формирование базы диода жидкостным травлением GaAs; напыление металлов и отжиг при многослойной металлизации в процессе формирования омического контакта Ni/Ge/Au/Ni/Au; пассивация периферии диода пленкой нитрида кремния; формирование межэлементной изоляции жидкостным травлением GaAs; гальваническое осаждение металлизации разводки; финишную пассивацию пленкой нитрида кремния для защиты прибора от внешних воздействий.

Для измерения ВАХ НДПП был использован измеритель параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500. Площадь перехода всех исследованных диодов составляла 80 мкм<sup>2</sup>. Измерение ВАХ диодов, полученных на всех использованных в экспериментах типах полупроводниковых структур, проводилось для выборки

объемом не менее 50 диодов с последующим усреднением результатов по величине тока.

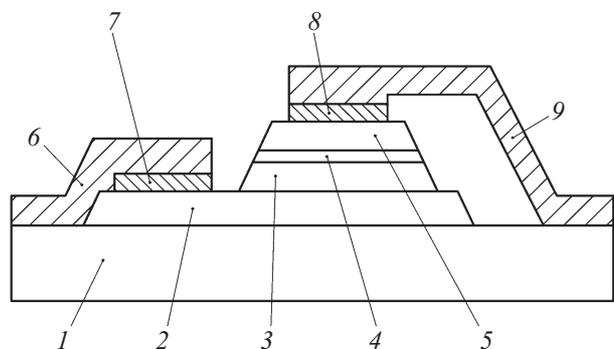
## 3. Результаты и анализ

### 3.1. НДПП на основе гомоэпитаксиальной структуры

Конструкция НДПП на основе гомоэпитаксиальной структуры (далее — структура 1) представлена на рис. 1 [3]. Диод формируется на полуизолирующей GaAs-подложке 1, на которой методом молекулярно-лучевой эпитаксии последовательно выращены следующие слои: контактный слой  $n^+$ -GaAs (2), слой  $i$ -GaAs (3), тонкий слой  $p^+$ -GaAs (4) и контактный слой  $n^+$ -GaAs (5). К слоям 2 и 5 формируются омические контакты 7 и 8 соответственно. Металлические выводы 6 и 9 являются соответственно катодом и анодом диода. Слой 4 с дырочным типом проводимости создает внутри структуры два  $p$ - $n$ -перехода, один из которых расположен на границе слоев 4 и 5, а второй является распределенным и расположен внутри слоя 3, в результате чего для электронов между слоями 2 и 5 формируется резко асимметричный треугольный потенциальный барьер. Подбором толщины слоя 4 и концентрации ионизованных акцепторов в данном слое достигается требуемая высота потенциального барьера.

В табл. 1 приведены рассчитанные оптимальные параметры слоев структуры 1, обеспечивающие минимальное значение плотности обратного тока при высоте потенциального барьера 0.2 В.

На рис. 2 (данные 1 и 2) представлены расчетная и экспериментальная ВАХ НДПП, изготовленных на основе полупроводниковой структуры 1. Из этих данных видно, что величина обратного тока диода в рабочем диапазоне величин обратного напряжения (от 0 до 4 В) может превышать 15 мА, что соответствует плотности тока  $> 20$  кА/см<sup>2</sup>. Данная величина плотности обратного



**Рис. 1.** Конструкция НДПП на основе структуры 1: 1 — полуизолирующая GaAs-подложка, 2 — контактный слой  $n^+$ -GaAs, 3 — слой  $i$ -GaAs, 4 — слой  $p^+$ -GaAs, 5 — контактный слой  $n^+$ -GaAs, 6 — металлический вывод катода, 7 — омический контакт катода, 8 — омический контакт анода, 9 — металлический вывод анода.

**Таблица 1.** Рассчитанные оптимальные параметры слоев структуры 1

Номер слоя (рис. 1)	Толщина слоя, нм	Материал слоя	Концентрация легирующей примеси, см <sup>-3</sup>
2	3000	n <sup>+</sup> -GaAs	5 · 10 <sup>18</sup>
3	350	i-GaAs	< 2 · 10 <sup>14</sup>
4	5	p <sup>+</sup> -GaAs	6.5 · 10 <sup>18</sup>
5	400	n <sup>+</sup> -GaAs	5 · 10 <sup>18</sup>

тока НДПП в 10<sup>3</sup>–10<sup>5</sup> раз превышает аналогичные значения, характерные для GaAs-диодов Шоттки [5], и является причиной снижения эффективности функционирования НДПП в качестве детектора СВЧ сигнала. Высокий обратный ток НДПП объясняется, с одной стороны, малой высотой потенциального барьера диода, а с другой — местом расположения, формой и закономерностями изменения высоты и ширины потенциального барьера при приложении обратного напряжения. Все это во многом определяется конструкцией полупроводниковой гомоэпитаксиальной структуры.

Анализ распределений электростатического потенциала в структуре 1, рассчитанных для различных значений напряжения на катоде относительно анода U<sub>c-a</sub> (рис. 3), свидетельствует о том, что рост обратного тока при увеличении обратного напряжения связан с существенным уменьшением высоты и ширины потенциального барьера. Уменьшение высоты барьера Δφ<sub>3-1</sub> при подаче обратного напряжения на диод (U<sub>c-a</sub> = 4 В) относительно его начального значения составило 0.12 В. Ширина потенциального барьера W<sub>3</sub> по уровню теплового потенциала электрона при величине обратного напряжения U<sub>c-a</sub> = 4 В составила 22 нм.

Наблюдаемый эффект обусловлен тем, что в состоянии без смещения, а также в состоянии с обратным смещением слой i-GaAs (рис. 1, слой 3), слой p<sup>+</sup>-GaAs (4) и часть анодного слоя n<sup>+</sup>-GaAs (5), граничащая с p<sup>+</sup>-слоем, полностью обеднены свободными носителями заряда. Таким образом, вершина потенциального барьера, расположенная в слое p<sup>+</sup>-GaAs (слой 4) структуры, находится внутри обедненной носителями заряда области и при этом существенно удалена от обогащенного носителями заряда анодного слоя n<sup>+</sup>-GaAs (слой 5). В условиях подачи внешнего обратного смещения на диод в обедненной носителями заряда области наблюдается суперпозиция внутреннего электростатического потенциала и внешнего электрического поля, что приводит к существенному изменению формы потенциального барьера, что и показывают расчетные данные, приведенные на рис. 3.

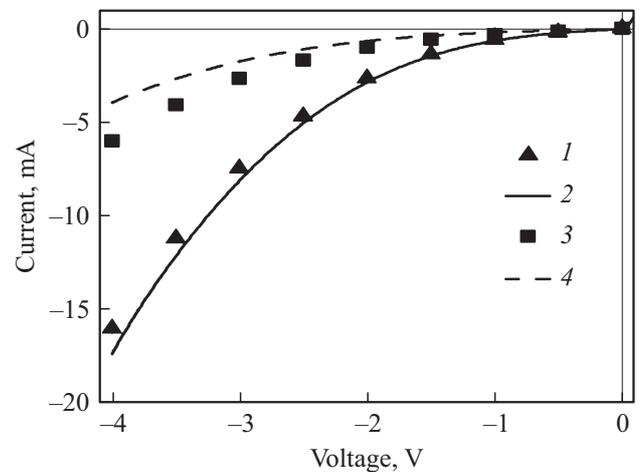
Не менее важным является тот факт, что потенциальный барьер в структуре 1 имеет форму, близкую к треугольной: с ростом обратного напряжения вершина потенциального барьера сужается, что делает ее более

туннельно-прозрачной и приводит к дополнительному уменьшению эффективной высоты потенциального барьера и росту обратного тока.

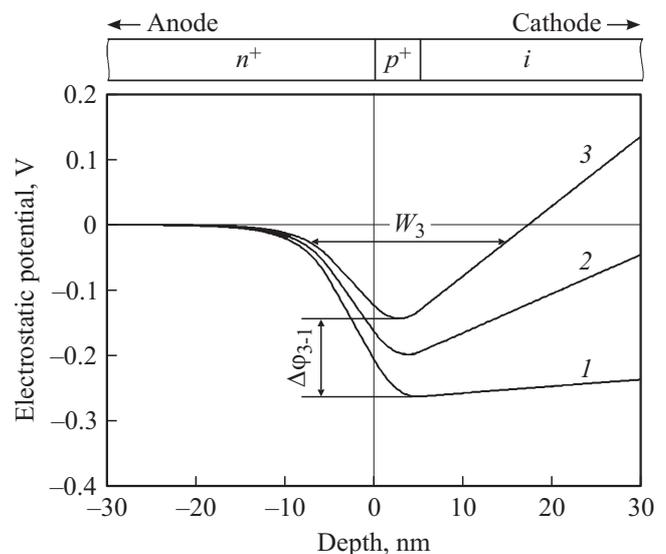
Анализ приведенных выше данных позволяет сделать вывод о том, что потенциальный барьер НДПП, обеспечивающий минимизацию величины обратного тока, должен отвечать следующим требованиям:

- частично или полностью располагаться в полупроводниковой области, обогащенной свободными носителями заряда, выполняющей роль экрана и минимизирующей влияние внешнего электрического поля на форму потенциального барьера;

- обладать достаточной эффективной высотой и шириной во всем диапазоне обратного напряжения, приложенного к НДПП.



**Рис. 2.** ВАХ НДПП с высотой потенциального барьера 0.2 В: 1 — расчетная, 2 — экспериментальная ВАХ на основе структуры 1; 3 — расчетная, 4 — экспериментальная ВАХ на основе структуры 2.



**Рис. 3.** Рассчитанные распределения электростатического потенциала по глубине для НДПП на основе структуры 1 при различных напряжениях U<sub>c-a</sub>, В: 1 — 0, 2 — 2, 3 — 4.

Таблица 2. Параметры слоев структуры 2

Номер слоя (рис. 1)	Толщина слоя, нм	Материал слоя	Концентрация легирующей примеси, см <sup>-3</sup>
2	3000	<i>n</i> <sup>+</sup> -GaAs	5 · 10 <sup>18</sup>
3	350	<i>i</i> -GaAs	< 2 · 10 <sup>14</sup>
4	4	<i>p</i> <sup>+</sup> -GaAs	3 · 10 <sup>18</sup>
	5	<i>i</i> -In <sub>0,25</sub> GaAs	< 2 · 10 <sup>14</sup>
5	5	<i>n</i> <sup>+</sup> -In <sub>0,25</sub> GaAs	5 · 10 <sup>18</sup>
	400	<i>n</i> <sup>+</sup> -GaAs	5 · 10 <sup>18</sup>

Проведенный теоретический анализ показал, что для классической гомоэпитаксиальной структуры 1 не представляется возможным найти конструкцию, удовлетворяющую перечисленным выше требованиям. Однако для структуры, содержащей комбинацию гомо- и гетеропереходов, эти требования выполнимы.

Конструкция предлагаемой модифицированной полупроводниковой структуры [7] (далее — структура 2) имеет следующие отличия по сравнению со структурой 1. Для получения структуры 2 в структуру 1 (рис. 1) на границе раздела слоев 3 и 4 вводятся два дополнительных слоя InGaAs, первый из которых имеет общую границу со слоем 4 и обладает собственной проводимостью (*i*-InGaAs), а второй имеет общую границу со слоем 3 и сильно легирован донорной примесью (*n*<sup>+</sup>-InGaAs). В результате на границах введенного слоя InGaAs формируются гетеропереходы InGaAs/GaAs, которые совместно с *p*-*n*-переходами образуют потенциальный барьер для электронов. Слой *i*-InGaAs в данной конструкции обеспечивает линейный закон изменения электростатического потенциала между потенциальными барьерами, сформированными гетеропереходами на границах слоя 4, а также *p*-*n*-переходами на границе слоев 3 и 4, и объединяет указанные потенциальные барьеры в один результирующий потенциальный барьер.

Степень легирования и толщина слоя *p*<sup>+</sup>-GaAs (4), а также мольная доля In в слое *i*-InGaAs определяют высоту результирующего потенциального барьера вблизи границы слоев 3 и 4. Степень легирования и мольная доля In в слое *n*<sup>+</sup>-InGaAs определяют высоту результирующего потенциального барьера вблизи границы слоев 4 и 5 (см. табл. 2).

В табл. 2 приведены параметры слоев структуры 2, полученные в результате оптимизации модели диода с помощью TCAD Synopsys.

На рис. 4 представлены результаты расчета распределений электростатического потенциала по глубине для структуры 2 (табл. 2) при различных значениях  $U_{c-a}$ . Как видно из рис. 4, часть результирующего потенциального барьера, сформированная гетеропереходом на границе слоев 4 и 5, расположена внутри *n*<sup>+</sup>-области. Данная область обогащена носителями заряда, за счет чего экранирует внешнее электрическое поле, прило-

женное к обедненной области структуры диода, что приводит к незначительному снижению потенциального барьера в области контакта слоев 4 и 5. Кроме того, результирующий потенциальный барьер имеет форму, близкую к трапеции, и обладает большей шириной по сравнению с треугольным потенциальным барьером, характерным для структуры 1. Уменьшение высоты барьера  $\Delta\phi'_{3-1}$  при подаче обратного напряжения на диод ( $U_{c-a} = 4$  В) относительно его начального значения составило 0,04 В (для структуры 1 — 0,12 В). Ширина потенциального барьера по уровню теплового потенциала электрона  $W'_3$  при  $U_{c-a} = 4$  В составила 40 нм (для структуры 1 — 22 нм).

Расчетные и экспериментальные ВАХ НДПП, изготовленных на основе структуры 2 и имеющих высоту

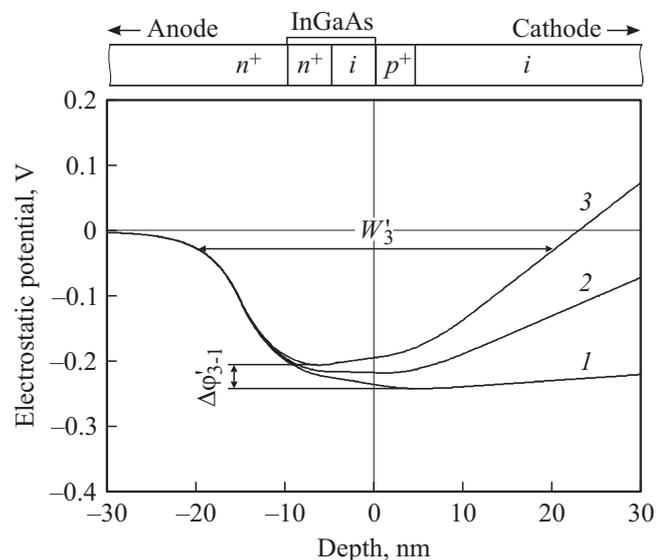


Рис. 4. Рассчитанные распределения электростатического потенциала по глубине для НДПП на основе структуры 2 при различных напряжениях  $U_{c-a}$ , В: 1 — 0, 2 — 2, 3 — 4.

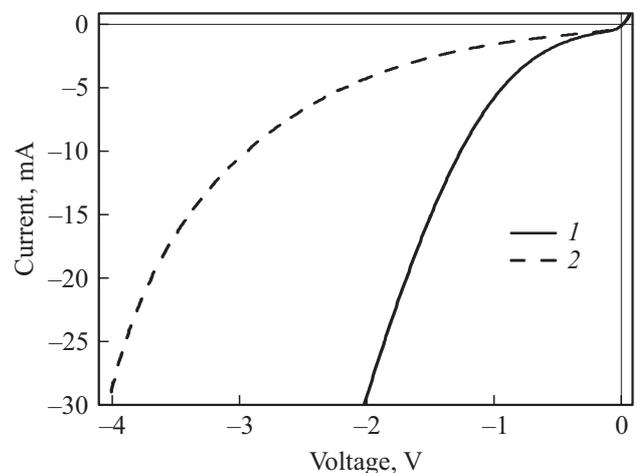


Рис. 5. Экспериментальные ВАХ НДПП с высотой потенциального барьера 0,17 В на основе гомоэпитаксиальной структуры (1) и гетероструктуры (2).

потенциального барьера 0.2 В, приведены на рис. 2 (кривые 3 и 4). Сравнительный анализ ВАХ диодов, изготовленных на основе структур 1 и 2, подтверждает эффективность предложенного подхода, направленного на улучшение параметров обратной ветви ВАХ НДПП. Формирование потенциального барьера НДПП с помощью гетеропереходов позволило существенно снизить обратный ток во всем рабочем диапазоне обратного напряжения.

Как свидетельствуют данные, представленные на рис. 5, НДПП с потенциальным барьером высотой 0.17 В, изготовленные на основе предложенной гетеро-структуры, также характеризуются существенным снижением обратного тока по сравнению с НДПП, выполненными на основе гомоэпитаксиальной структуры.

Экспериментальное исследование репрезентативной выборки диодов с различной высотой потенциального барьера 0.17–0.20 В показало, что переход от гомоэпитаксиальной к гетероэпитаксиальной структуре не приводит к ухудшению остальных важнейших параметров НДПП (емкость перехода, прямое сопротивление потерь) и связанных с этими параметрами характеристик.

#### 4. Заключение

Предложенный в настоящей работе способ формирования потенциального барьера НДПП с помощью комбинации гомо- и гетеропереходов позволяет по сравнению с диодом на основе гомоэпитаксиальной структуры существенно снизить плотность обратного тока НДПП во всем рабочем диапазоне обратного напряжения. Полученные результаты открывают дополнительные возможности по созданию СВЧ детекторов мощности с улучшенными характеристиками и особенно актуальны для детекторов на основе НДПП со сверхнизкой высотой потенциального барьера, предназначенных для работы в широком динамическом и частотном диапазонах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения № 14.577.21.0204 от 27.10.15, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57715X0204.

#### Список литературы

- [1] I. Dale, A. Condie, S. Neylon, M.J. Kearney. *IEEE MTT-S Digest*, 467 (1989).
- [2] Z. Hu, V.T. Vo, A.A. Rezazadeh. *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, **15** (3), 150 (2005).
- [3] M.P. Zurakowski. US Patent N 4, 839, 709 (1989).
- [4] A.S. Zagorodny, N.N. Voronin, I.V. Yunusov, V.A. Gushchin. *Proc. 15th Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)* (2014) p. 164.
- [5] S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (New Jersey, Wiley, 2007).
- [6] И.В. Юнусов, А.М. Ющенко, А.Ю. Плотникова, В.С. Арыков, А.С. Загородный. *Изв. вузов. Физика*, № 9/2, 294 (2012).

- [7] И.В. Юнусов, В.С. Арыков, А.М. Ющенко, А.Ю. Плотникова. Патент РФ № 2561779 (2015).
- [8] Д. Радченко, К. Сбитнев, Н. Малеев. *Производство электроники: технология, оборудование, материалы*, № 7–8, 57 (2009).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Heterojunction low barrier GaAs diodes with improved reverse current–voltage characteristic

I.V. Yunusov<sup>+,\*</sup>, V.A. Kagadei<sup>+</sup>, A.Y. Fazleeva<sup>+</sup>, V.S. Arykov<sup>+</sup>

<sup>+</sup> Micran, Research and Production Company, 634041 Tomsk, Russia

<sup>\*</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050 Tomsk, Russia

**Abstract** Modified semiconductor structure which uses homo- and heterojunction properties is proposed and implemented for low barrier diode in this work. Proposed semiconductor structure allows to reduce reverse current density significantly without degradation of other main diode parameters. The improvement was obtained due to formation of heterojunctions in a homostructure. This modification allows to create potential barrier with the shape which is close to optimal. Theoretical results calculated with use of TCAD Synopsys and experimental current–voltage curves of diodes fabricated on homo- and heterostructures are presented. Significant reduction of reverse current is demonstrated for diodes with barrier height 0.2 and 0.17 V.