

Исследование планарно-легированных структур на основе арсенида галлия для сверхвысокочастотных диодов с объемным потенциальным барьером

© Н.А. Малеев, В.В. Волков*, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, М.Ф. Кокорев†, В.М. Устинов

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

* АОЗТ "Светлана-Электронприбор",

194156 Санкт-Петербург, Россия

† Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,

197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 23 июля 1998 г. Принята к печати 28 июля 1998 г.)

Диоды с планарно-легированным потенциальным барьером — приборы с переносом заряда основными носителями, для которых возможно управление высотой потенциального барьера и формой вольт-амперных характеристик за счет определенного сочетания слоев при выращивании эпитаксиальных структур. Эти приборы выступают в качестве потенциальной замены диодов с барьером Шоттки для ряда сверхвысокочастотных применений. В настоящей работе мы исследуем некоторые типичные проблемы, возникающие при выращивании структур с планарно-легированным потенциальным барьером методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Предлагается технология получения структур, основанная на сочетании газофазной эпитаксии с молекулярно-пучковой эпитаксией. Исследуются различные методы формирования омических контактов в структурах с планарно-легированным потенциальным барьером. Разработана технология, обеспечивающая малые контактные сопротивления ($< 6 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) и высокий процент выхода годных диодов ($> 95\%$). Изготовленные сверхвысокочастотные диоды с планарно-легированным потенциальным барьером сопоставляются с диодами Шоттки на основе арсенида галлия.

Диоды с объемным потенциальным барьером, формируемым в эпитаксиальной структуре на основе арсенида галлия n -типа проводимости за счет введения тонкого слоя p -типа, были предложены и экспериментально реализованы в начале 80-х годов [1]. Их появление стало возможным в связи с развитием современных эпитаксиальных технологий, в первую очередь молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

Существуют две основных разновидности таких диодных структур: так называемые кэмел-диоды, в которых легированный p -слой размещается непосредственно в слое с проводимостью n -типа, и диоды с планарно-легированным потенциальным барьером (ПЛД). В ПЛД перенос тока осуществляется основными носителями (электронами) через потенциальный барьер, формируемый путем введения тонкого p^+ -слоя в нелегированную область (i -область), расположенную между двумя слоями n -типа проводимости (рис. 1). При этом толщина (t) и уровень легирования (N_A) p^+ -слоя таковы, что он полностью обеднен основными носителями (дырками) [2,3].

В планарно-легированных структурах возможно контролируемое управление высотой потенциального барьера за счет изменения параметров эпитаксиальной структуры. В противоположность этому для диодов с барьером Шоттки (ДБШ) на основе арсенида галлия высота барьера Φ_b составляет примерно $0.7 \div 0.8 \text{ эВ}$ для большинства используемых металлов. Это обстоятельство важно при создании структур с малой высотой потенциального барьера, необходимых для сверхвысокочастотных (СВЧ) детекторных диодов с нулевым

смещением и смесительных диодов в системах с малой мощностью гетеродина. Обычно в качестве таких приборов применяются низкобарьерные ДБШ на основе Si [4], InP [5] или InGaAs [6]. По сравнению с ними ПЛД имеют

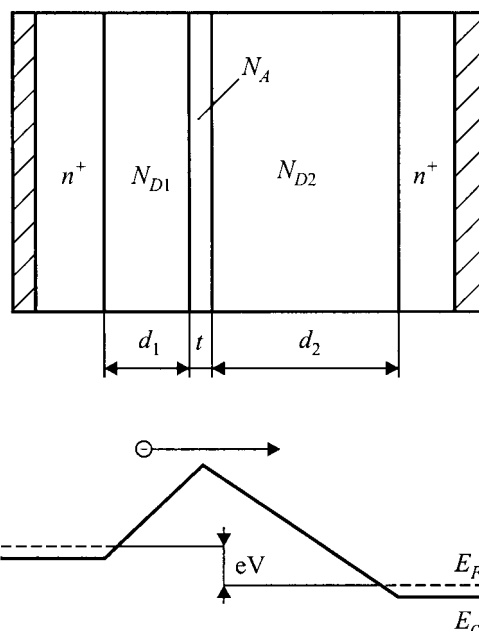


Рис. 1. Принцип действия диода с планарно-легированным потенциальным барьером. Уровень легирования p^+ -слоя $N_A = (1 \div 10) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщина $t = 5 \div 10 \text{ нм}$; уровень легирования i -слоев $N_{D1}, N_{D2} < 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщины $d_1, d_2 = 10 \div 1000 \text{ нм}$.

Таблица 1. Параметры тестовых структур ПЛД

Образец	$d_1, \text{нм}$	$d_2, \text{нм}$	$t, \text{нм}$	$N_A, \text{см}^{-3}$	Коэффициент идеальности		$\Phi_b, \text{мВ}$	
					расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
2-640	200	100	10	$4 \cdot 10^{17}$	1.5	1.5	368	577
2-641	300	100	10	$4 \cdot 10^{17}$	1.33	1.5	410	697
2-680	150	30	10	10^{18}	1.2	1.34	344	476

ряд важных преимуществ. Поскольку область потенциального барьера в ПЛД находится вдали от поверхности и формируется в процессе выращивания эпитаксиальной структуры, то отсутствуют проблемы, связанные с воздействием качества обработки поверхности под барьерный контакт на характеристики диодов, и снижается уровень низкочастотных шумов, обусловленных влиянием поверхностных состояний [7,8]. ПЛД имеют более высокую температурную стабильность характеристик по сравнению с ДБШ [9]. Наконец, диоды с планарно-легированным барьером более устойчивы к импульсным перегрузкам [10].

Ключевая проблема, решение которой необходимо для обеспечения требуемых характеристики ПЛД и их воспроизводимости, — контроль заряда и пространственного положения тонкого p^+ -слоя. Другой важный аспект — обеспечение низкого уровня фоновое легирования и заданной толщины i -слоев. Технологическим методом, в наибольшей степени удовлетворяющим указанным требованиям, является МПЭ.

Отмеченные выше результаты в области создания высококачественных ПЛД достигнуты именно с использованием структур, выращенных МПЭ. Тем не менее существует целый ряд конструктивных и технологических проблем, связанных с необходимостью совершенствования характеристик ПЛД, улучшения воспроизводимости параметров и повышения выхода годных диодов.

В настоящей работе исследуются различные методы формирования омических контактов к планарно-легированным структурам с объемным потенциальным барьером, оптимизируется конструкция и технология выращивания структур ПЛД методом МПЭ, а также проводится сравнительное исследование характеристик СВЧ ПЛД и ДБШ на основе GaAs.

На первом этапе исследования отработывалась технология получения структур ПЛД с заданными вольт-амперными характеристиками (ВАХ) и величиной барьерной емкости. Была изготовлена серия тестовых образцов, отличающихся толщинами нелегированных слоев (d_1, d_2), положением и уровнем легирования (N_A) p^+ -слоя. Выращивание планарно-легированных структур проводилось методом МПЭ на установке Riber-32P. В качестве донорной примеси использовался Si, а акцепторной — Be. Для проверки качества эпитаксиальных структур и соответствия их параметров расчетным значениям были изготовлены тестовые диоды в виде меза-структур диаметром 70 мкм, верхним омическим

контактом диаметром 50 мкм и кольцевым омическим контактом к нижнему n^+ -слою. Омические контакты AuGe/Ni/Au формировались с использованием технологии, ранее оптимизированной для изготовления СВЧ полевых транзисторов [11]. При травлении меза-структур применялся перекисно-аммиачный травитель.

В приближении полного обеднения (т. е. в предположении резких границ обедненных областей) и при достаточно высоком потенциальном барьере для описания вольт-амперных характеристик ПЛД можно использовать простую аналитическую модель [2,3]. В рамках указанного приближения высота потенциального барьера Φ_b в отсутствие внешнего напряжения дается соотношением

$$\Phi_b = \frac{eN_A t}{\epsilon \epsilon_0} \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2},$$

где e — заряд электрона, ϵ_0 — электрическая постоянная, $\epsilon = 13.1$ — относительная диэлектрическая проницаемость GaAs. Если падение напряжения на нелегированных слоях намного больше теплового потенциала kT/e , то в большинстве случаев ток через барьер в обоих направлениях определяется термоэлектронной эмиссией. Плотность этого тока можно определить как

$$J = A^{**} T^2 \exp \left[-\frac{e(\Phi_b - E_F)}{kT} \right] \times \left\{ \exp \left[\frac{eV}{n_2 kT} \right] - \exp \left[-\frac{eV}{n_1 kT} \right] \right\},$$

где $A^{**} = 4.4 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2 \cdot \text{К}$ — эффективная постоянная Ричардсона для GaAs, T — абсолютная температура, V — приложенное напряжение, n_1, n_2 — коэффициенты идеальности, определяемые соотношениями

$$n_1 = \frac{d_1 + d_2}{d_1}, \quad n_2 = \frac{d_1 + d_2}{d_2}.$$

Удельная (на единицу площади) емкость ПЛД примерно постоянна и в приближении полного обеднения равна

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0}{d_1 + d_2}.$$

В табл. 1 приведены проектные параметры некоторых из выращенных структур, а также расчетные и экспериментальные значения параметров, характеризующих ВАХ тестовых ПЛД. Наблюдаемое систематическое превышение высоты барьера над расчетной может быть

Таблица 2. Сопоставление методов формирования верхнего омического контакта

Структура верхнего контактного слоя (толщина, уровень легирования)	Контактная металлизация	Режим вплавления (вжигания)	Типичные значения контактного сопротивления ρ_c , Ом · см ²	Выход годных тестовых диодов, % (диаметр меза-структур 70 мкм)
n^+ -GaAs (400 нм, $3 \cdot 10^{18}$ см ⁻³)	AuGe/Ni/Au	420°C, 30 с, атмосфера H ₂	$(1.95 \div 3.4) \cdot 10^{-7}$	74
n^+ -GaAs (400 нм, $3 \cdot 10^{18}$ см ⁻³)	AuGe/Ni/Au	300°C, 30 мин, атмосфера H ₂	$(2.1 \div 3.2) \cdot 10^{-7}$	89
n^+ -In _{0.5} Ga _{0.5} As (50 нм, $1 \cdot 10^{19}$ см ⁻³) / grad-In _x Ga _{1-x} As (50 нм, $5 \cdot 10^{18}$ см ⁻³) / n^+ -GaAs (50 нм, $3 \cdot 10^{18}$ см ⁻³)	Ti/Pt/Au	300°C, 5 мин, атмосфера H ₂	$(4.9 \div 5.6) \cdot 10^{-7}$	94

Таблица 3. Сопоставление технологий изготовления ПЛД

Особенности МПЭ	Тип подложки	Заряд p^+ -слоя, см ⁻²	Нижний контактный слой; контакт	Верхний контактный слой; контакт	Φ_b , мВ		Выход годных диодов, %
					расчет	эксперимент	
A	n^+ -GaAs	10^{12}	n^+ -GaAs, 0.5 мкм; AuGe/Ni/Au	n^+ -GaAs, 0.4 мкм; AuGe/Ni/Au	372	392 ± 87	73
B	SI GaAs	$4 \cdot 10^{11}$	n^+ -GaAs, 4.5 мкм; AuGe/Ni/Au	n^+ -GaAs, 0.3 мкм; AuGe/Ni/Au	414	527 ± 41	86
C	SI GaAs	$6.5 \cdot 10^{11}$	n^+ -GaAs, 5.0 мкм ГФЭ +0.5 мкм МПЭ; AuGe/Ni/Au	n^+ -InGaAs/GaAs, 0.15 мкм; Ti/Pt/Au	384	382 ± 17	96

Примечание. Для всех образцов проектное значение $t = 10$ нм. A, B — установка ЭП1203 без вращения образца; C — установка Riber 32P с вращением образца.

связано с некоторым превышением реальной концентрации Ве относительно предполагаемой, поскольку емкостные измерения подтверждают хорошее соответствие общей толщины нелегированной области расчетной. В соответствии с полученными данными были скорректированы режимы роста планарно-легированного p^+ -слоя.

Актуальной проблемой в технологии ПЛД является воспроизводимость при формировании верхнего омического контакта. Применение сплавных контактов на основе AuGe возможно при достаточно толстом верхнем n^+ -слое (не менее $0.3 \div 0.4$ мкм), поскольку могут образовываться локальные области с большой глубиной проникновения контактного слоя. Альтернативные варианты состоят в использовании несплавных омических контактов, получаемых путем вжигания контактного металлического покрытия при температурах ниже эвтектической (так называемый диффузионный контакт) или за счет очень сильного легирования приповерхностной области исходной эпитаксиальной структуры [2].

Нами исследовались обе возможности. Диффузионные контакты на основе металлизации AuGe/Ni/Au формировались путем вжигания при 300°C в течение 30 мин в атмосфере водорода. При этом обеспечивался более высокий процент выхода годных тестовых диодных структур (до 90%) по сравнению со сплавными контактами. Однако более перспективной представляется разработанная технология формирования омических контактов на основе металлизации Ti/Au или Cr/Au. Для ее реализации вместо контактного слоя n^+ -GaAs последовательно выращивались слои n^+ -GaAs, n^+ -Ga_xIn_{1-x}As с переменным составом и n^+ -Ga_{0.5}In_{0.5}As. Общая толщина контактных слоев составляла 0.15 мкм. Различные технологии формирования омических контактов сопоставляются в табл. 2. Технология, основанная на применении несплавных контактов, обеспечивает высокий выход годных структур (более 95%), воспроизводимость и низкое контактное сопротивление ($\rho_c < 5 \cdot 10^{-7}$ Ом · см²).

Как и для ДБШ на основе GaAs, при создании сверхвысокочастотных ПЛД используются два основных типа приборных структур: на проводящих (n^+ -GaAs) и на полуизолирующих (SI GaAs) подложках [7,8]. Последний вариант более перспективен с точки зрения продвижения в миллиметровый диапазон, поскольку структуры на полуизолирующей подложке позволяют создавать диоды с балочными выводами, имеющие минимальные паразитные параметры [5]. Кроме того, такие структуры потенциально пригодны для реализации монолитных интегральных схем. В диодах на полуизолирующей подложке обычно применяются относительно толстые скрытые n^+ -слои (толщиной $4 \div 6$ мкм), обеспечивающие малое последовательное сопротивление [8,12]. Поскольку характерные скорости роста GaAs для МПЭ составляют ~ 1 мкм/ч, время выращивания таких эпитаксиальных структур существенно возрастает. Для уменьшения длительности процесса МПЭ была разработана комбинированная технология, заключающаяся в выращивании структур с планарным легированием на стандартных эпитаксиальных структурах САГ-5 ($4 \div 5$ мкм n^+ -GaAs на подложке SI GaAs), получаемых газофазной эпитаксией (ГФЭ). Для предотвращения образования потенциального барьера на границе эпитаксиальной структура/подложка процесс выращивания начинался с δ -легирования Si с поверхностной концентрацией $5 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$.

Существенное влияние на качество эпитаксиальных структур для ПЛД и однородность их параметров оказывают такие факторы, как особенности используемой установки МПЭ (в первую очередь однородность потоков и характерные плотности дефектов эпитаксиальных слоев), а также режимы роста (в частности, использование или неиспользование вращения подложки). Результаты комплексного сравнения различных методов выращивания структур ПЛД приведены в табл. 3. Очевидно, что последний вариант (технология С) превосходит два первых (технологии А и В) по основным параметрам.

В ходе настоящего исследования были разработаны ПЛД, пригодные для использования в балансных смесителях 3-сантиметрового диапазона. Рабочие приборы реализованы в виде монолитной диодной пары (два диода в одном кристалле). При этом использована планарная конструкция на полуизолирующей подложке с изолирующей воздушными мостами (рис. 2), позволяющая легко реализовать малые размеры активной области и обеспечивающая минимальные паразитные емкости. Рабочая эпитаксиальная структура выращивалась на полуизолирующей подложке арсенида галлия (SI GaAs) АГЧП-8 по технологии С и состояла из следующих слоев: скрытый n^+ -слой толщиной 5 мкм (выращивался газофазной эпитаксией), n^+ -слой толщиной 0,3 мкм, нелегированный слой толщиной 150 нм, p^+ -слой толщиной 10 нм, легированный Be ($N_A = 7 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$), нелегированный слой толщиной 60 нм и верхний контактный слой общей толщиной 0,15 мкм. Диаметр мез составлял 15 мкм, а верхнего омического контакта —

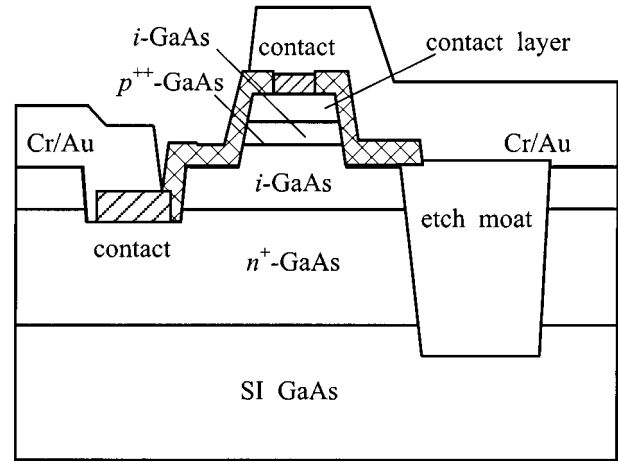


Рис. 2. Конструкция диода.

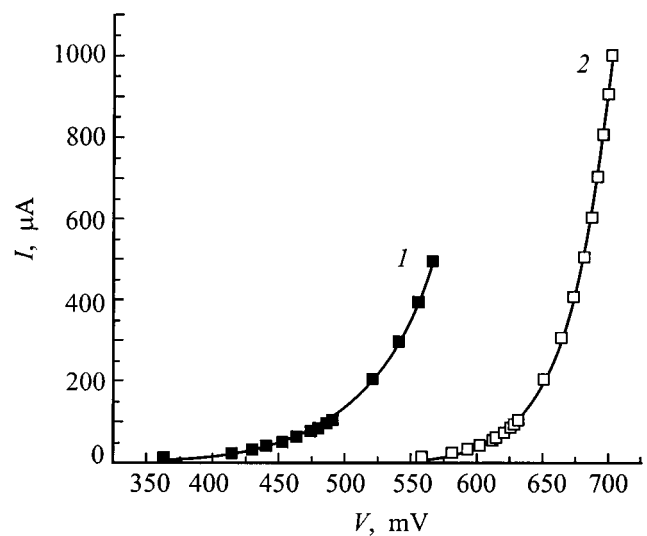


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики диодов на основе GaAs: 1 — ПЛД, 2 — ДБШ.

10 мкм. Для приготовления меза-структур использовались перекисно-сернохлорный и перекисно-аммиачный травители. Пассивация приборов осуществлялась диоксидом кремния, полученным плазмо-химическим осаждением. Нижний сплавной омический контакт формировался с использованием металлизации AuGe/Ni/Au, а верхний несплавной — Ti/Pt/Au. Процесс изготовления прибора завершался формированием второй металлизации на основе Cr/Au, гальваническим выращиванием Au, травлением воздушных мостов и разделением кристаллов. Описанные конструкция и технология изготовления диодов потенциально пригодны и для приборов миллиметрового диапазона (при реализации бескорпусного исполнения с балочными выводами).

Для адекватной оценки характеристик ПЛД по аналогичной технологии были изготовлены ДБШ на основе GaAs с активным слоем толщиной 0,15 мкм, уровнем

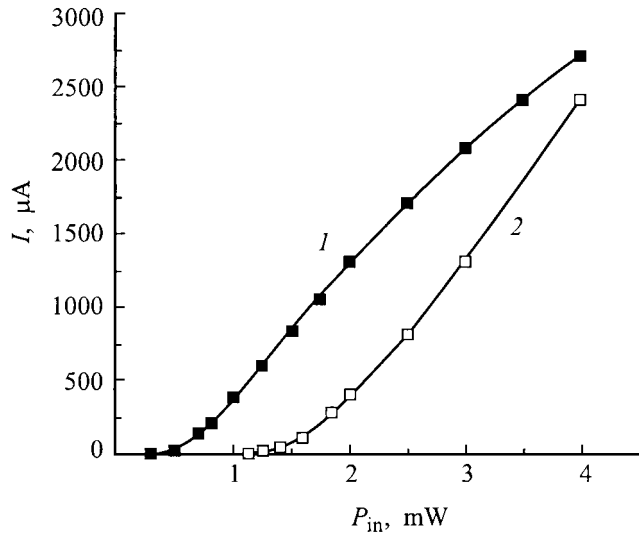


Рис. 4. Сравнение диодов на основе GaAs при работе в режиме детектора с нулевым смещением: 1 — ПЛД, 2 — ДБШ.

легирования $(5 \div 6) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и диаметром барьерного электрода 10 мкм. На рис. 3 изображены вольт-амперные ($I-V$) характеристики диодов, а на рис. 4 — зависимости выпрямленного тока I от мощности СВЧ сигнала P_{in} при детектировании в режиме с нулевым смещением (сопротивление нагрузки 100 Ом).

Проведенные исследования показывают, что для ПЛД характерна относительно слабая зависимость емкости от напряжения и меньшая высота барьера по сравнению с ДБШ на GaAs. Разработанная технология обеспечивает высокую однородность параметров отдельных диодов, что особенно важно при реализации балансных смесителей. Более высокая чувствительность ПЛД при малых мощностях сигнала позволяет использовать их в смесителях с низким уровнем сигнала гетеродина. Сравнение доплеровских шумов балансных смесителей, изготовленных с применением ПЛД и ДБШ на GaAs, показало, что ПЛД обеспечивают снижение уровня низкочастотных шумов в 1.5–2 раза и по этому параметру не уступают лучшим коммерческим ДБШ на основе Si. При этом смесители на основе ПЛД обеспечивали заданное значение коэффициента преобразования при мощностях гетеродина в 3–4 раза меньших, чем требуется при использовании ДБШ на основе GaAs.

Таким образом, разработана технология изготовления структур на основе арсенида галлия с планарно-легированными барьерами методом МПЭ, а также разработаны конструкция и технология изготовления СВЧ диодов на базе этих структур. Предложенный подход обеспечивает воспроизводимость параметров, снижение времени эпитаксиального процесса, возможность формирования несплавных омических контактов и реализацию диодов планарной конструкции. Продемонстрированы преимущества ПЛД по сравнению с ДБШ на GaAs.

Список литературы

- [1] R.J. Malik, R.T. Aucoin, R.L. Ross, K. Board, C.E.C. Wood, L.F. Eastman. *Electron. Lett.*, **16**, 836 (1980).
- [2] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991).
- [3] M.J. Kearney, I. Dale. *GEC J. Res.*, **8**, 1 (1990).
- [4] B.L. Sharma, S.C. Gupta. *Sol. St. Technol.*, **23**, 90 (1980).
- [5] В.Г. Божков, В.В. Вилисова, К.И. Куракан, О.Ю. Малаховский, Т.М. Табакеева. *Электронная промышленность*, N 9, 82 (1993).
- [6] P. Marsh, D. Pavlidis, K. Hong. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **44**, 7 (1997).
- [7] J. Dale, A. Condie, S. Neylon, M.J. Kearney. *IEEE MTT-S Digest*. (1989) p. 467.
- [8] S. Hutchinson, M. Carr, R. Gwilliam, M.J. Kelly, B.J. Sealy. *Electron. Lett.*, **31**, 583 (1995).
- [9] V.V. Tuyen, B. Szentpali. *J. Appl. Phys.*, **68**, 2824 (1990).
- [10] I. Dale, A. Condie, S. Neylon, M.J. Kearney. *19 Eurup Microwave Conf. Proc.* (1989) p. 237.
- [11] В.М. Устинов, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, В.А. Красник, Н.А. Малеев. *Микроэлектроника*, **23**, 13 (1994).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of planar doped gallium arsenide structures for bulk potential barrier microwave diodes

N.A. Maleev, V.V. Volkov*, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, M.F. Kokorev†, V.M. Ustinov

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

* Svetlana-Electronpribor, Closed Stock Company,
194156 St.Petersburg, Russia

† State Electrotechnical University,
197376 St.Petersburg, Russia

Abstract The planar doped barrier diode is a majority carrier device in which it is possible to control the barrier height and degree of rectification from within a series of epitaxially grown layers. These are promising devices for substitution of Schottky diodes in different microwave applications. In this work we investigate some particular technological problems for the planar doped barrier structures obtained by molecular-beam epitaxy growth. The planar doped barrier structure fabrication method by combination of vapor phase epitaxy with molecular-beam epitaxy is proposed. Different methods for the planar doped barrier diode contacts fabrication are investigated. Proposed contact technology provides the low contact resistance (less than $6 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$) and high diode yield ($> 95\%$). The fabricated microwave planar doped barrier diodes are compared to the gallium arsenide Schottky diodes.

Fax: (812) 2478640

E-mail: maleev@beam.ioffe.rssi.ru