

УДК 621.315.592

**ОДНОДНОЯМНЫЕ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫЕ
ДИОДНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ
 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}/\text{InP}$ С ОТНОШЕНИЕМ ПИКОВОГО ТОКА
К ТОКУ ДОЛИНЫ 22:1 ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

В. С. Сызранов, О. А. Клименко, А. С. Ермолов, И. П. Казаков,
С. С. Шмелев, В. И. Егоркин, В. Н. Мурзин

Исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) резонансно-туннельных диодных $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}/\text{InP}$ структур при 300 К и 77 К. Зарегистрированы значения отношений пикового тока к току в долине 22 : 1 при температуре 300 К и 44 : 1 при 77 К, что соответствует максимальным значениям для $\text{InGaAs}/\text{AlAs}/\text{InP}$ гетероструктур, не использующих в конфигурации дополнительного слоя InAs квантовой подъямы.

Ключевые слова: резонансное туннелирование, квантовые ямы, диодные $\text{InGaAs}/\text{AlAs}$ гетероструктуры, токовые характеристики.

Одним из перспективных в функциональной микроэлектронике является направление, использующее эффект резонансного туннелирования. Благодаря чрезвычайно малой инерционности внутренних электронных процессов резонансно-туннельного диода (РТД) (около 1 пс при комнатной температуре [1]) данное направление открывает возможности для продвижения электроники в область субтерагерцовых (суб-ТГц) и терагерцовых (ТГц) частот, что имеет принципиальное значение для информатики, систем связи, молекулярной спектроскопии, астрофизики и ряда других разделов науки и техники. Важное приложение в микроэлектронике могут найти скоростные интегральные схемы (ИС) на функционально интегрированных элементах РТД/полевой транзистор (ПТ), РТД/ПТ/диод Шоттки и др. [2–4]. Ключевым элементом таких ИС является элемент высокого быстродействия – РТД, характеристики которого в большой степени определяются величиной пикового тока и отношением пикового тока к току в долине (П/Д). Наиболее выраженными резонансными характеристиками, на данный момент, обладают РТД на основе соединений $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$, выращенных на подложке InP .

ФИАН, 119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, 53; e-mail: oleg.klimenko@mail.ru.

В настоящее время активно ведутся разработки в области интеграции РТД с оптоэлектронными приборами. Показательными являются разработки цифровых ИС на платформе MOBILE (monostable-bistable transition logic element), в которых планируется использование не только интегрированных элементов РТД/ПТШ, но и пар РТД - оптические приборы для реализации высокоскоростного интерфейса (до 100 Гбит/с) [2, 3]. Самый ранний подобный РТД со строго подобранными параметрами решетки, состоял из $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ потенциальной ямы и $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ барьеров [5, 6]. Замещая согласованные по постоянной решетки барьеры $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ псевдоморфными AlAs барьерами, было найдено, что соотношение тока в пике к току в долине может быть увеличено от 6.7 до 14 при 300 К [7]. Плотность тока в пике может превышать 460 кА/см^2 при значении П/Д равном 4 [8]. Сообщается, что величина П/Д может быть увеличена от 17 до 30 путём введения псевдоморфной InAs квантовой подъямы в $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$ РТД. Именно на структурах такого типа были получены рекордные значения П/Д, равного 53 [9]. Это связано с тем, что более низкое значение эффективной массы электрона в InAs квантовой яме по сравнению с $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ увеличивает разность энергий между первым и вторым резонансными уровнями по сравнению с $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$ РТД без InAs квантовой подъямы, что и приводит к увеличению П/Д. При этом наличие дополнительных слоев и механически напряженных слоев сопряжено с усложнением технологии изготовления гетероструктур, что приводит к неоднородности слоев, которая выражается в низкой воспроизводимости параметров конечных элементов.

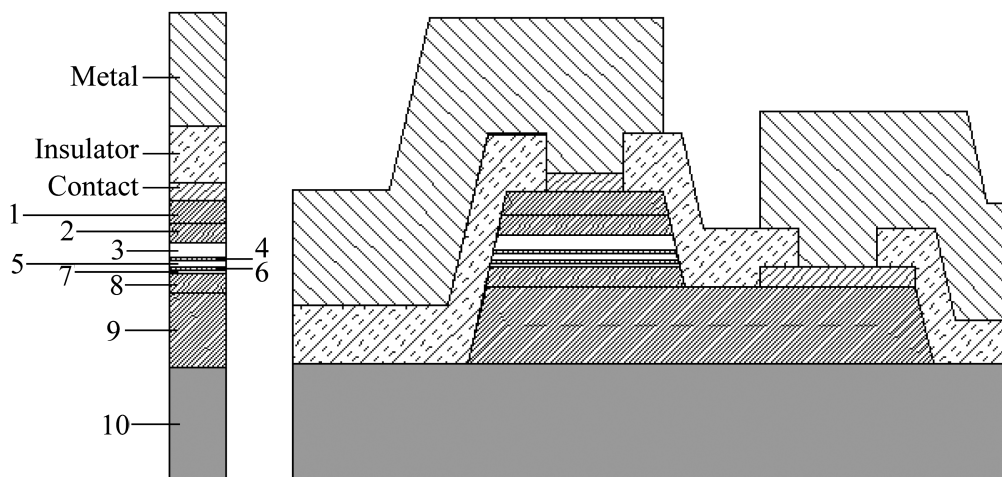


Рис. 1: Эскиз поперечного разреза гетероструктуры РТД на основе $\text{InGaAs}/\text{AlAs}/\text{InP}$. Нумерация слоёв соответствует таблице 1.

Настоящая работа посвящена изучению резонансных свойств технологически повторяемых РТД гетероструктур на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}/\text{InP}$ с целью их использования как в качестве элементов СВЧ функциональной микроэлектроники, так и для генерации электромагнитного излучения суб-ТГц и ТГц диапазона. Для этого исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) ряда изготовленных РТД при температурах 300 К и 77 К.

На рис. 1 приведена конфигурация изготовленных в ходе выполнения настоящей работы РТД структур, выращенных на полуизолирующей подложке InP. Гетероструктура РТД располагается на буферном слое и состоит из слоев легированного $n\text{InGaAs}$, барьеров AlAs и слоя InGaAs, образующего квантовую яму. В верхней части структура включает эмиттерный слой $n\text{InGaAs}$. Состав и значения толщин слоев, а также концентрации легирующих примесей приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Характеристики слоев гетероструктуры

Номер Слоя	Материал	Назначение слоя	Концентрация примесей, см^{-3}	Толщина слоев, нм
1	$n - \text{InGaAs}$	эмиттерный контакт	$1 \cdot 10^{19}$	30
2	$n - \text{InGaAs}$	эмиттер	$1 \cdot 10^{18}$	25
3	$i - \text{нелегир. InGaAs}$	спейсер		20
4	Нелегир. AlAs	барьер		2
5	InGaAs	яма		4.5
6	Нелегир. AlAs	барьер		2
7	$i - \text{нелегир. InGaAs}$	спейсер		2
8	$n - \text{InGaAs}$	коллектор	$1 \cdot 10^{18}$	25
9	$n - \text{InGaAs}$	коллекторный контакт	$1 \cdot 10^{19}$	400
10	InP	подложка		

Ниже приводятся данные измерений для образцов, изготовленных по одной и той же технологии. Площадь мезы исследованных образцов составляла 20–40 $\mu\text{м}^2$. Измерения ВАХ РТД осуществлялись при комнатной температуре $= 300$ К (рис. 2), а также при температуре жидкого азота $= 77$ К (рис. 3). Измерения проводились по специальной методике, позволяющей свести к минимуму влияние сопротивлений и высокочастотных импедансов подводящих проводников и измерительной аппаратуры. Методика будет описана отдельно.

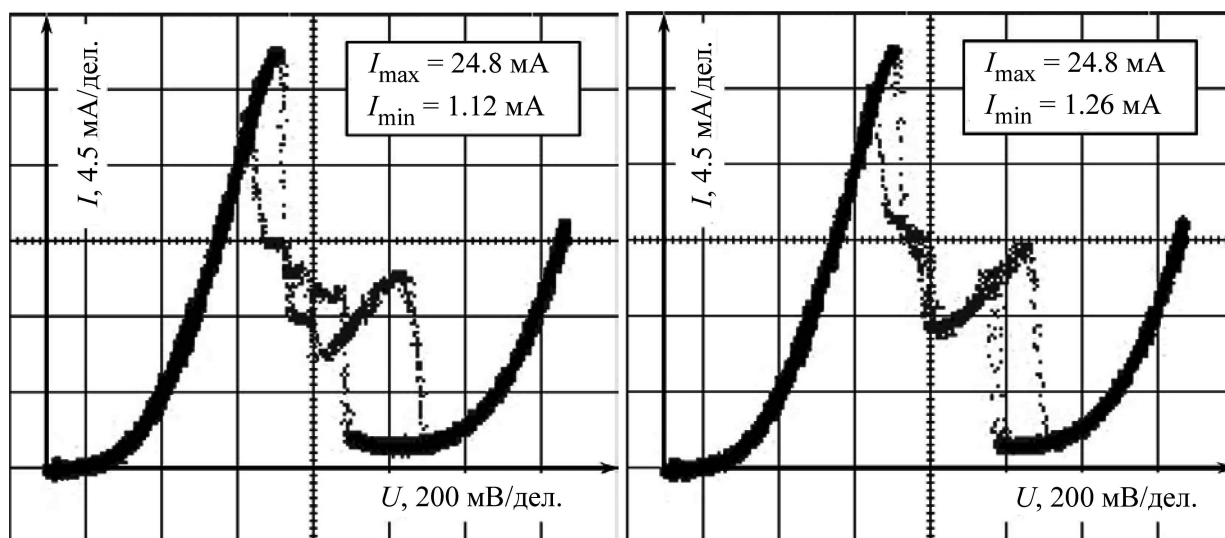


Рис. 2: Измеренные при комнатной температуре ВАХ двух образцов РТД (слева – № 1, справа – № 2) одной серии с размером мезы 5×8 мкм² ($T = 300$ К).

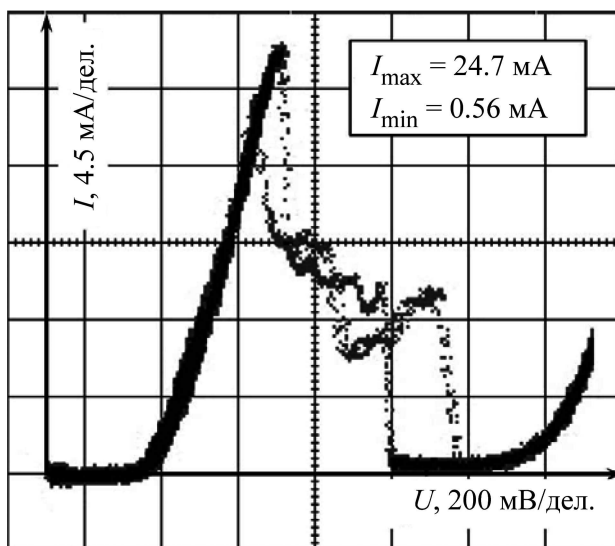


Рис. 3: Измеренная при температуре 77 К ВАХ образца РТД № 1 с размером мезы 5×8 мкм².

Как видно из рис. 2 и 3, зависимость тока через РТД от приложенного напряжения в целом носит типичный N -образный характер. Наиболее важные особенности ВАХ образцов РТД приходятся на интервал напряжений в области отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП). Пиковая плотность тока РТД варьируется в пределах $(1 - 2) \cdot 10^5$ А/см² (максимальное значение – $1.95 \cdot 10^5$ А/см²). Соотношение П/Д ва-

рируется в разных образцах в пределах 19–22 при 300 К и достигает в случае образца № 1 $\Pi/\text{Д} = 22$ (при 300 К) и $\Pi/\text{Д} = 44$ (при 77 К).

Как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого азота зарегистрированы особенности ВАХ в области ОДП. В начале области ОДП наблюдается резкий спад тока (при $U \approx 600$ мВ для образца № 1, $T = 300$ К), обусловленный переходом из устойчивого токового состояния в неустойчивое. При дальнейшем увеличении напряжения наблюдается устойчивая токовая ветвь ВАХ с положительным дифференциальным сопротивлением (в интервале напряжений $U \approx 700 - 900$ мВ), которая заканчивается вторым переключением тока из одного устойчивого состояния в другое (при $U \approx 900$ мВ).

Таким образом, исследованы ВАХ РТД гетероструктур на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}/\text{InP}$ при температурах 300 К и 77 К. Достигнутая величина $\Pi/\text{Д} = 22$ при 300 К и $\Pi/\text{Д} = 44$ при 77 К соответствует максимальным значениям для $\text{InGaAs}/\text{AlAs}/\text{InP}$ гетероструктур, не использующих в конфигурации дополнительного слоя InAs квантовой подъямы.

Полученные результаты указывают на достаточность свойств структур $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}/\text{InP}$ РТД для создания на их основе высокоэффективных функциональных ИС с пониженной величиной статического энергопотребления. Зарегистрированные величины $\Pi/\text{Д}$ также указывают на возможность достижения высоких уровней генерации суб-ТГц и ТГц излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.513.11.3079), РФФИ (№ 11-02-12133-офи_м, № 11-02-01182, № 11-02-00432-а), Программы Президиума РАН № 24 и ОФН РАН IV.12 и III.7.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] N. Shimizu, T. Nagatsuma, T. Waho et al., *Electron. Lett.* **31**(19), 1695 (1995).
- [2] K. Maezawa, H. Matsuzaki, J. Osaka et al., *IEEE Electron Dev. Lett.* **19**, 80 (1998).
- [3] C. Pacha, P. Glosekotter, K. F. Gosser, *IEEE Trans. VLSI Sys.* **8**(5), 558 (2000).
- [4] M. Reddy, S. C. Martin, A. C. Molnar et al., *IEEE Electron Dev. Lett.* **18**(5), 218 (1997).
- [5] T. Inata, S. Muto, Y. Nakata et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **25**, L983 (1986).
- [6] R. C. Potter, A. A. Lakhani, D. Beyea, and H. Hier, *J. Appl. Phys.* **63**(12), 5875 (1988).

- [7] T. Inata, S. Muto, Y. Nakata et al., Jpn. J. Appl. Phys. **26**, L1332 (1988).
- [8] T. P. E. Broekaert and C. G. Fonstad, J. Appl. Phys. **68**, 4310 (1990).
- [9] J. H. Smet, T. P. E. Broekaert, C. G. Fonstad, J. Appl. Phys. **71**, 2475 (1992).

Поступила в редакцию 6 ноября 2012 г.