

Электрические свойства изотипных гетеропереходов

N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb II типа

© М.А. Ахметоглы (Афрайлов)[✉], И.А. Андреев[✉], Е.В. Куницына, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев

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

* Улудаг университет, Отделение Физики,

16059 Горакл, Бурса, Турция

Department of Physics, Uludag University,

16059 Gorukle, Bursa, Turkey

(Получена 24 мая 2006 г. Принята к печати 7 июня 2006 г.)

Изучены зонные диаграммы, а также вольт-амперные и вольтемкостные характеристики изотипных гетероструктур N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb. Исследованы механизмы протекания темного тока при различных температурах. Показано, что разъединенный гетеропереход демонстрирует свойства диода Шоттки, и вольт-амперные характеристики проявляют выпрямляющие свойства во всем температурном диапазоне 90–300 К. При высоких температурах и низких напряжениях преобладает термоэлектронная эмиссия. Этот ток обусловлен термической активацией и забросом электронов из GaInAsSb в GaSb через барьер на гетероинтерфейсе. Сравнение теоретических и экспериментальных данных показало, что при низких температурах туннельный механизм протекания тока является определяющим как для прямого, так и для обратного газа.

PACS: 73.40.Kp, 79.40.+z

1. Введение

В последние годы GaSb/GaInAsSb-гетероструктуры привлекают внимание исследователей как перспективные материалы для создания оптоэлектронных приборов для спектрального диапазона 1.5–4.8 мкм. На основе данных гетероструктур были разработаны эффективные светодиоды [1–3] и быстродействующие фотодиоды [4,5], которые могут быть использованы для детектирования вредных промышленных газов, а также в волоконных оптических линиях связи нового поколения на основе флюоритных стекол с чрезвычайно низкими потерями. Особенности зонной структуры гетеропереходов II типа приводят к локализации электронов и дырок в самосогласованных квантовых ямах по обе стороны от гетерограницы [6]. В зависимости от состава твердого раствора $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ изменяется электронное сродство, ширина запрещенной зоны узкозонного материала, и, следовательно, в зависимости от степени перекрытия зон на гетерогранице GaSb/ $Ga_{1-x}In_xSb_{1-y}$ может быть сформирован как ступенчатый, так и разъединенный гетеропереход II-типа. В ступенчатых гетеропереходах II типа ($x = 0.24$) либо зона проводимости, либо валентная зона одного полупроводника лежит вне запрещенной зоны другого материала, и разрыв зон имеет один и тот же знак. Разъединенный гетеропереход II типа формируется в гетероструктурах, когда ни зона проводимости, ни валентная зона узкозонного твердого раствора $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$ ($x \geq 0.80$) не лежат внутри запрещенной зоны широкозонного материала [7]. Электроны и дырки взаимно проникают через интерфейс, и при

гетерогранице формируется сильный изгиб зон, препятствующий данному процессу переноса. Было показано, что гетеропереход II типа проявляет свойства диода Шоттки, в котором широкозонный (в $P-p$ -структуре) либо узкозонный полупроводник (в $N-n$ -структуре) играет роль металла [6,8].

В данной работе мы будем рассматривать только ступенчатые переходы II типа на основе изопериодной GaSb/ $GaIn_{0.2}AsSb/GaAl_{0.34}AsSb$ -гетероструктуры. Нами были исследованы зависимости темного тока от напряжения для изотипных гетероструктур N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb в температурном диапазоне 90–300 К и выявлены основные механизмы протекания темного тока при различных температурах и напряжениях. Полученные результаты будут полезны как для совершенствования технологии получения материалов, так и для создания оптоэлектронных приборов.

2. Описание эксперимента

Гетероструктуры N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложках GaSb (100), легированных теллуром (Te) до концентрации $5-7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В процессе эпитаксии на подложках последовательно наращивались узкозонный слой n^0 -GaIn_{0.2}AsSb толщиной 2–3 мкм ($E_g = 0.54 \text{ эВ}$) и широкозонный слой N^+ -GaAl_{0.34}AsSb толщиной 1.5–2 мкм ($E_g = 1.1 \text{ эВ}$) с концентрацией носителей $1-3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

На базе полученных пластин с гетероструктурами методом стандартной фотолитографии создавались меза-диоды с диаметром фоточувствительной площадки 250–300 мкм. Для исследования электрических харак-

[✉] E-mail: igor@iropt9.ioffe.ru

[✉] E-mail: afrailov@uludag.edu.tr

теристик при различных температурах образцы помещались в стеклянный дюар с охлаждаемым экраном. Для измерения вольт-амперных характеристик использовался пикоамперметр Keithley-485; вольтемкостных — $C-V$ -анализатор Keithley-590. Данные, поступающие по стандартному интерфейсу IEEE-488, обрабатывались при помощи компьютера.

Исследование вольт-фарядных характеристик показало, что распределение примеси в гетероструктурах было резкое, при этом концентрация носителей в узкозонном слое GaInAsSb мала и составляет $n = 3-5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

3. Обсуждение результатов

Типичные вольт-амперные характеристики двойной изотипной GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb-гетероструктуры при различных температурах представлены на рис. 1. Прямое напряжение соответствует положительному потенциалу на широкозонном GaAlAsSb-материале. Из рис. 1 видно, что зависимости темного тока проявляют выпрямляющие свойства в температурном диапазоне 160–300 К. Ни в прямой, ни в обратной ветвях $I-V$ -характеристик не наблюдается насыщения, что говорит о низкой плотности поверхностных состояний. Исследуемые структуры были изопериодными, рассогласование параметров решетки „подложка-слой“ не превышало $1 \cdot 10^{-3}$, следовательно, ожидаемая нами плотность поверхностных состояний не превышала $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Зонная энергетическая диаграмма гетероструктуры N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb в равновесии (а), при прямом (b) и обратном (c) смещении представлена

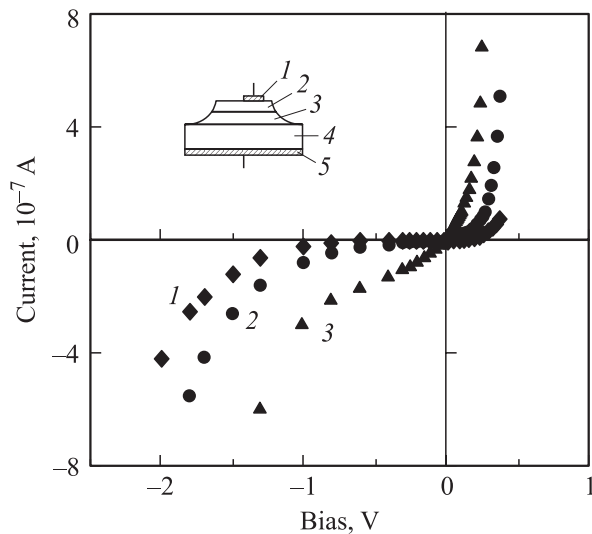


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики изотипной N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb-гетероструктуры при трех различных температурах. T , К: 1 — 160, 2 — 230, 3 — 300. На вставке схематически представлена структура меза-диода: 1, 5 — омические контакты, 2 — слой N^+ -GaAlAsSb, 3 — узкозонный слой n^0 -GaInAsSb, 4 — подложка N^+ -GaSb.

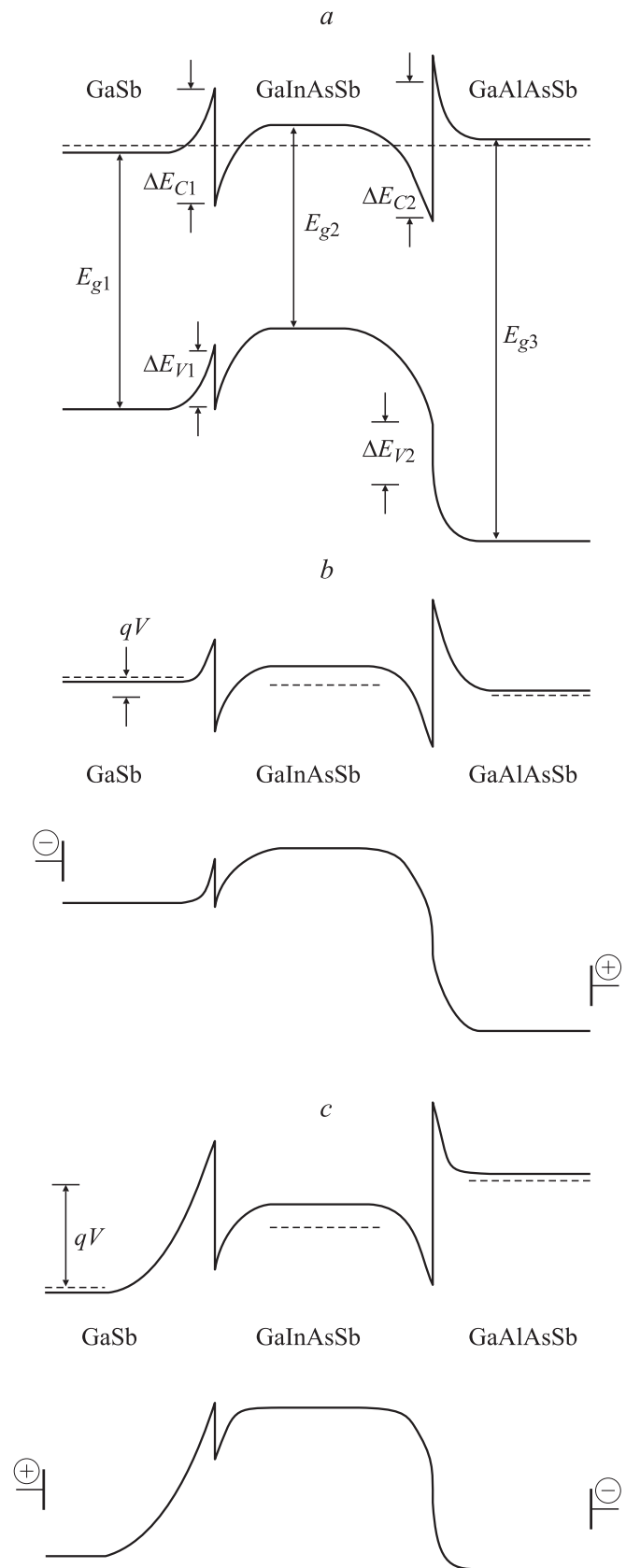


Рис. 2. Зонные диаграммы изотипной N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb-гетероструктуры в равновесии (а), при прямом (b) и обратном (c) смещении.

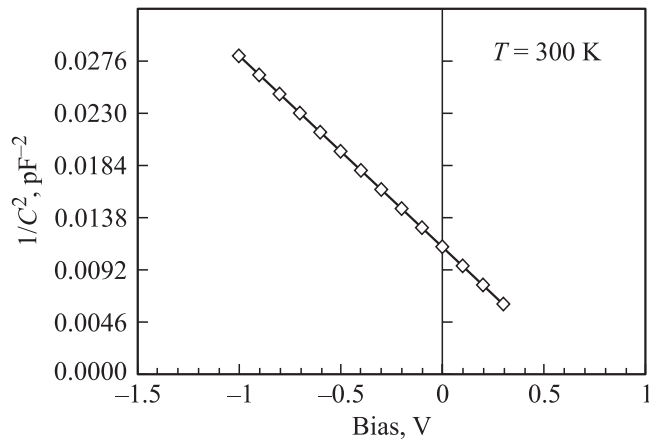


Рис. 3. Типичная вольт-фарадная характеристика изотипной N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb-гетероструктуры при $T = 300$ К.

на рис. 2. Разрывы зон на интерфейсе GaSb/GaInAsSb составляют $\Delta E_{C1} = 0.3$ эВ и $\Delta E_{V1} = 0.1$ эВ [9], что согласуется с данными работы [10]. По результатам измерений были вычислены разрывы зон на интерфейсе GaInAsSb/GaAlAsSb: $\Delta E_{C2} = 0.51$ и $\Delta E_{V2} = 0.15$ эВ.

Механизмы протекания тока через N^+ - n -гетеропереход подобны механизмам, характерным для перехода металл-полупроводник: диффузия, термоэлектронная эмиссия, а также туннелирование носителей через барьер. При высоких температурах основную роль играет термоэлектронная эмиссия носителей через барьер. В этом случае ток как функция приложенного напряжения определяется следующим выражением [11]:

$$I = I_0 \left(1 - \frac{V_a}{V_i} \right) \left[\exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right) - 1 \right]. \quad (1)$$

Здесь

$$I_0 = \frac{qAR^*TV_i}{k} \exp \left(-\frac{qV_i}{kT} \right), \quad (2)$$

где R^* — эффективная постоянная Ричардсона, V_a — приложенное напряжение, V_i — контактная разность потенциалов, A — площадь перехода, все остальные символы имеют свой обычный смысл.

Несмотря на то что формула [1] сходна с выражением для тока через барьер металл-полупроводник, температурная зависимость несколько отличается, и ток при обратном смещении возрастает с напряжением. Контактная разность потенциалов N^+ - n -гетероперехода с концентрациями N_D^* и N_D определяется [12]:

$$V_i = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_D^+ N_C}{N_D N_C^+} \right] + \frac{\Delta E_c}{q}, \quad (3)$$

где N_C^+ и N_C — эффективные плотности состояний в слабо- и сильнолегированных областях соответственно.

Типичная вольт-фарадная характеристика, полученная при температуре $T = 300$ К и на частоте $f = 1$ МГц, представлена на рис. 3. При малых смещениях $V < 0.8$ В характеристики удовлетворительно описываются зависимостью $C^{-2} \propto V$, типичной для резкого гетероперехода [13]

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{A^2} \frac{2(\varepsilon_1 N_{D1} + \varepsilon_2 N_{D2})}{q\varepsilon_1 \varepsilon_2 N_{D1} N_{D2}} (V_i - V_a), \quad (4)$$

где ε_1 и ε_2 — диэлектрические постоянные материалов GaInAsSb и GaAlAsSb соответственно; N_{D1} и N_{D2} — концентрация доноров.

Концентрация носителей заряда в узкозонном материале GaInAsSb, определенная по наклону $C^{-2} = f(V)$ -зависимости, составила $N_{D1} = 3-5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$. Напряжение отсечки V_i для зависимостей $C^{-2} = f(V)$ на графиках составило величину 0.56 В.

3.1. Прямые ветви вольт-амперных характеристик

Теоретические и экспериментальные зависимости прямого тока от напряжения при различных температурах представлены на рис. 4. Ток через переход как функция приложенного напряжения описывается следующим выражением:

$$I = I_0 \left(1 - \frac{V_a}{V_i} \right) \left[\exp \left(\frac{qV_a}{\beta kT} \right) - 1 \right], \quad (5)$$

где коэффициент неидеальности β возрастает с увеличением температуры от 3.36 до 6.78. Это говорит о преобладании туннельной компоненты тока во всем исследованном диапазоне температур. Однако для прямого

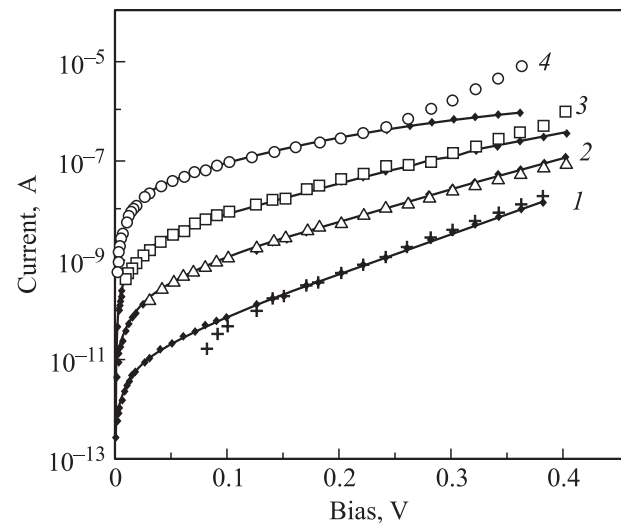


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики прямо смещенной изотипной N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb-гетероструктуры (1-4) при температурах 90, 160, 230 и 300 К соответственно. Теоретический расчет — сплошные линии, эксперимент — дискретные значки.

смещения, большего чем 0.25–0.35 В, коэффициент β , определенный по наклону ($I-V$) характеристик, при высоких температурах $T \geq 230^\circ\text{C}$ равен $\beta = 1.2-1.3$, что говорит о преобладании термоэлектронной природы тока (рис. 4). Действительно, в первую очередь обратное смещение на гетеропереходе понижает высоту барьера. Именно поэтому ток обуславливается термоэмиссией электронов через барьер из узкозонного материала GaInAsSb в широкозонный полупроводник.

При низких температурах туннельные процессы становятся преобладающими во всем диапазоне приложенных напряжений. Это подтверждается большим значением β -фактора, полученным из ($I-V$) характеристик при низких температурах (рис. 4).

3.2. Обратные ветви вольт-амперных характеристик

Обратные ветви вольт-амперных характеристик ($I-V$) как функция температуры представлены на рис. 5. Обратное напряжение соответствует отрицательному потенциалу на широкозонном материале GaAlAsSb. Для больших смещений при высокой температуре и во всем диапазоне приложенных напряжений при низкой температуре ток через переход как функция приложенного напряжения может быть представлен в виде

$$I = I_0 \left(1 - \frac{V_a}{V_i}\right) \left[\exp\left(\alpha \frac{qV_a}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV_a}{\beta kT}\right) - 1 \right], \quad (6)$$

где α — постоянная, величина которой при различных температурах представлена в таблице.

Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей при обратном смещении для нескольких температур показано на рис. 6. При комнатной температуре легкое насыщение обратного тока наблюдается при малых смещениях $V < 800$ мВ, показывая на превалирование в этом случае термоэлектронной эмиссии. Данный механизм протекания тока обусловлен термической активацией и забросом электронов из GaInAsSb в GaSb через барьер на гетерогранице и описывается соотношением (5) с фактором $\beta = 1.1$. Так как высота барьера со стороны узкозонного слоя GaInAsSb остается неизменной, основной причиной возрастания обратного тока с напряжением является частичное туннелирование электронов из GaInAsSb в GaSb. Действительно, большие обратные напряжения приводят к тому, что барьер сужается и становится прозрачным для туннелирования значительного числа электронов из GaInAsSb. При

Экспериментальные данные для теоретических расчетов, полученные из $I-V$ - и $C-V$ -измерений

T , К	V_0 , В	I_0 , 10^{-9} А	α	β
300	0.51	8.2	0.076	2.74
230	0.62	2.0	0.046	3.20
160	0.80	0.8	0.032	7.80

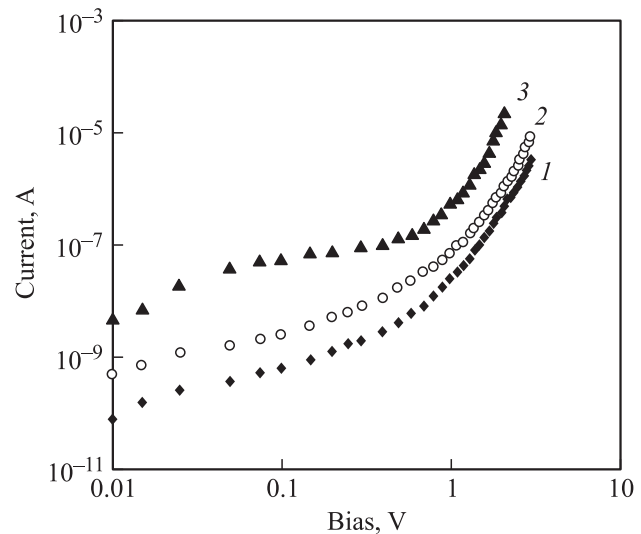


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики обратно смещенной изотипной $N^+-GaSb/n^0-GaInAsSb/N^+-GaAlAsSb$ -гетероструктуры в двойном логарифмическом масштабе при температурах 160, 230 и 300 К, кривые 1–3 соответственно.

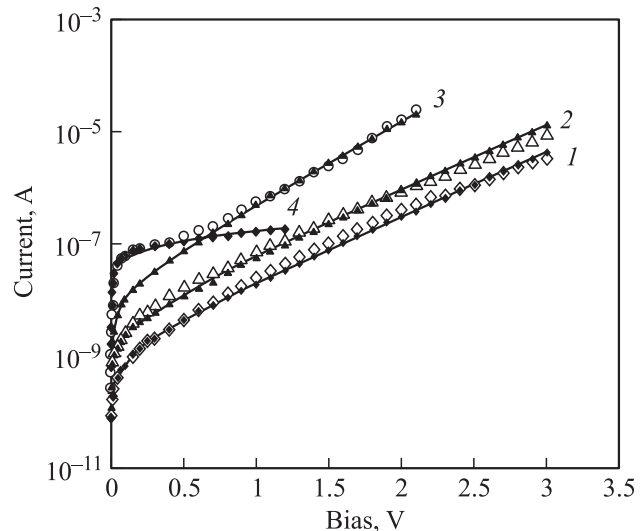


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики обратно смещенной изотипной $N^+-GaSb/n^0-GaInAsSb/N^+-GaAlAsSb$ -гетероструктуры при температурах 160, 230 и 300 К, кривые 1–3 соответственно. Теоретический расчет для туннельного тока — сплошные линии, эксперимент — дискретные значки. Для $T = 300$ К представлен расчет также для термоэмиссионного механизма протекания тока (кривая 4).

низких температурах туннельный механизм протекания обратного тока доминирует, так как преодоление барьера становится невозможным. Это подтверждается слабой температурной зависимостью обратного тока при низких температурах (рис. 7).

На рис. 7 представлены температурная зависимость обратного тока для смещений $U = 0.4$ и $U = 1.0$ В и теоретические температурные зависимо-

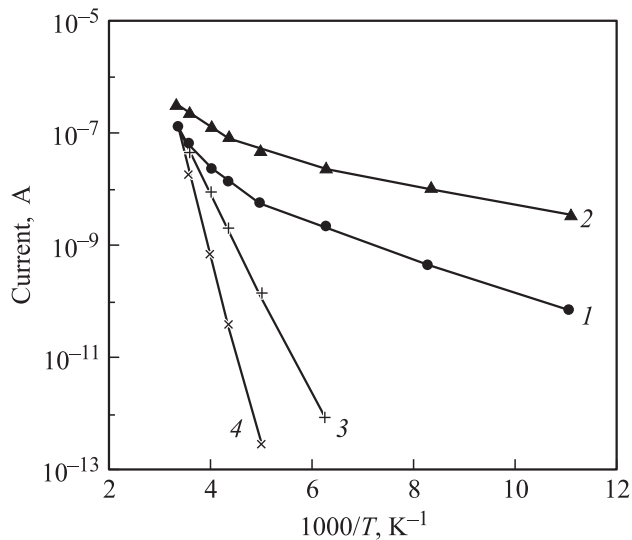


Рис. 7. Температурная зависимость величины обратного темнового тока для изотипной N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb-гетероструктуры при смещении -0.4 В (кривая 1) и -1.0 В (кривая 2). Теоретические температурные зависимости темнового тока для генерационно-рекомбинационного механизма (энергия активации равна $E_g/2$, кривая 3) и диффузионного механизма (энергия активации равна E_g , кривая 4).

сти для генерационно-рекомбинационного механизма и диффузионного механизма темнового тока. Отклонение экспериментальной зависимости от теоретической для генерационно-рекомбинационного тока при низких температурах обусловлено возрастанием туннельной компоненты темнового тока [14]. Эта компонента характеризуется слабой температурной зависимостью и начинает преобладать в узкозонных материалах при высоких напряжениях и низких температурах. Энергия активации, оцененная из данной зависимости в области высоких температур, равна $E_A = 0.3$ эВ, что близко к высоте барьера для электронов в GaInAsSb на GaSb/GaInAsSb-интерфейсе и соответствует данным для ΔE_c , полученным в [9,10]. Полученное значение энергии активации является доказательством преобладающего вклада термоэлектронной эмиссии в темновой ток при высоких температурах и малых смещениях. При высоких обратных напряжениях ток определяется туннелированием во всем диапазоне температур 90–300 К, что подтверждается слабой температурной зависимостью обратного тока.

4. Заключение

В работе представлены результаты исследования природы темнового тока в изотипной гетероструктуре при различных температурах. Показано, что вольт-амперные характеристики данных структур проявляют выпрямляющие свойства во всем температурном диапазоне 90–300 К. Насыщения в прямых и обратных ветвях

вольт-амперных характеристик не наблюдалось, что говорит о низкой плотности поверхностных состояний в гетероструктуре. При высоких температурах и низких напряжениях преобладает термоэлектронная эмиссия. Этот ток обусловлен термической активацией и забросом электронов из GaInAsSb в GaSb через барьер на гетероинтерфейсе. Сравнение теоретических и экспериментальных данных показало, что при низких температурах туннельный механизм протекания тока является определяющим как для прямого, так и для обратного тока. Исследование данных гетеропереходов обеспечивает базис для создания фотодиодов для спектрального диапазона 3–5 мкм, актуального для третьего поколения ИК волоконно-оптических систем, проблем экологии и защиты окружающей среды.

Список литературы

- [1] L.M. Dolginov, L.M. Druzhinina, P.G. Eliseev, I.V. Kryukova, V.I. Leskovich. *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-13**, 609 (1977).
- [2] H. Kano, S. Miazava, K. Sugiyama. *Electron. Lett.*, **16**, 146 (1980).
- [3] А.Н. Баранов, Б.Е. Джуртанов, А.Н. Именков, А.А. Рогачев, Ю.М. Шерняков, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **20** (12), 2217 (1986).
- [4] G. Bougnot, F. De Lannoy. *J. Electrochem. Soc.*, **135**, 783 (1988).
- [5] A.N. Baranov, A.N. Imenkov, M.P. Mikhailova, A.A. Rogachev, Yu.P. Yakovlev. *Proc. SPIE*, **1048**, 188 (1989).
- [6] M.P. Mikhailova, A.N. Titkov. *Semicond. Sci. Technol.*, **9**, 1279 (1994).
- [7] М.А. Афрайлов, А.Н. Баранов, А.П. Дмитриев, М.П. Михайлова, Ю.П. Сморгачева, И.Н. Тимченко, В.В. Шерстнев, И.Н. Ясевич, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **24** (6), 1397 (1990).
- [8] И.А. Андреев, А.Н. Баранов, М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, А.В. Пенцов, Ю.П. Сморгачева, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *Письма ЖТФ*, **18** (17), 50 (1992).
- [9] М.А. Афрайлов, М.П. Михайлова, N.R. Rahimov. *Turk. J. Phys.*, **21**, 1229 (1997).
- [10] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, А.Н. Титков, В.Н. Чебан, Ю.П. Яковлев, Э. Гулицус, И. Освальд, И. Панграц, Т. Шимечек. *ФТП*, **27** (4), 615 (1993).
- [11] M.S. Tyagi. *Introduction to Semiconductor Materials and Devices* (Wiley, N.Y., 1991).
- [12] J. Bart Van Zeghbroeck. *Principles of Electron Devices* (University of Colorado, Boulder, 1996).
- [13] M. Mebarki, D. Boukredimi, S. Sadik, J.L. Lazzari. *J. Appl. Phys.*, **73**, 2360 (1993).
- [14] J.L. Moll. *Physics of Semiconductors* (McGraw-Hill, N.Y., 1964).

Редактор Л.В. Беляков

Electrical Characteristics of the Isotype

N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb

Type II Heterojunction

M. Ahmetoglu (Afrailov), I.A. Andreev, E.V. Kunitsyna,
M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev*

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

* Department of Physics, Uludag University,
16059 Gorukle, Bursa, Turkey

Abstract $I-V$, $C-V$ characteristics and energy band diagrams have been studied for LPE grown isotype N^+ -GaSb/ n^0 -GaInAsSb/ N^+ -GaAlAsSb heterostructures at several temperatures. It is shown that a type II staggered heterojunction can behave as the Schottky diodes and the dark current-voltage characteristics of this isotype heterostructures were rectifying over the whole temperature range 90–300 K. Thermionic emission current dominates at high temperatures in a small reverse bias region. This current is due to thermal activation of electrons from GaInAsSb into GaSb over the barrier at the heterointerface. The qualitative comparison of experimental results with theory shows that at low temperatures the tunneling mechanism of the current flow dominates in both forward and reverse biases.