

06

Электрические свойства фотодиодов на основе $p\text{-GaSb}/p\text{-GaInAsSb}/N\text{-GaAlAsSb}$ гетеропереходов

© *M. Ahmetoglu (Afrailov), G. Kaupak, И.А. Андреев, Е.В. Куницына, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев*

Department of Physics, Uludag University, 16059, Gorukle, Bursa, Turkey
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: igor@iropt9.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2008 г.

Проведено исследование электрических характеристик фотодиодов на основе $p\text{-GaSb}/p\text{-GaInAsSb}/N\text{-GaAlAsSb}$ гетеропереходов. Изучены механизмы протекания тока в гетероструктурах при различных температурах. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов показало, что при низких температурах ($T < 150\text{ K}$) как для прямого, так и для обратного тока преобладает туннельный механизм протекания. Величина туннельного тока становится определяющей при напряженности электрического поля $p\text{-}n$ перехода не менее 10^5 V/cm и есть следствие малой ширины запрещенной зоны исследуемых материалов и малых эффективных масс электронов и дырок.

PACS: 73.40.Kp, 85.60.Dw

Гетероструктуры на основе твердых растворов GaInAsSb широко используются для создания оптоэлектронных приборов (как излучателей, так и фотоприемников) в спектральном диапазоне $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$. Такие приборы являются важными компонентами оптических систем связи на основе флюоридных и халькогенидных стекол, а также систем экологического мониторинга [1], поскольку полосы поглощения ряда вредных промышленных газов и загрязнений лежат в данном спектральном диапазоне [2].

Главные области применения фотодиодов связаны с диодно-лазерной спектроскопией, с анализом газовых сред, продуктов питания и биологических объектов, с лазерной дальнометрией и локацией. Все эти применения резко отличаются по сути построения аппаратуры регистрации излучения (лазеры, светодиоды, естественное излучение объектов). Из

этого следует, что требуются фотоприемники с различными параметрами и характеристиками. Так, в системах дальнометрии и локации основным параметром является быстродействие и шумовые характеристики фотодиода, а в системах газового анализа потребуется большая площадь фотоприемной площадки и высокая обнаружительная способность. Высокая обнаружительная способность фотодиодов в широком диапазоне частот в основном определяется величиной темновых токов.

В данной работе представлены результаты исследования электрических свойств p -GaSb/ p -GaInAsSb/ N -GaAlAsSb фотодиодных гетероструктур при различных температурах с целью выяснения механизмов токопереноса в них, с задачей реализовать фотодиоды для спектрального диапазона $1.5\text{--}3.0\ \mu\text{m}$ с низким уровнем обратных темновых токов, пригодных для создания аппаратуры различного назначения [3,4].

Гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb [5,6] были выращены методом жидкофазной эпитаксии на нелегированных подложках GaSb (100) с концентрацией носителей $p = (2\text{--}5) \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$. Узкозонный активный слой p -Ga_{0.78}In_{0.22}As_{0.18}Sb_{0.82} ($E_g = 0.53\ \text{eV}$, $T = 300\ \text{K}$), также как и широкозонный слой N -Ga_{0.66}Al_{0.34}As_{0.025}Sb_{0.975} ($E_g = 1.1\ \text{eV}$, $T = 300\ \text{K}$) легировался теллуром Те до концентрации $p = (1\text{--}8) \cdot 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ и $N = (1\text{--}3) \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$, соответственно. Эпитаксиальные слои были изопериодны с подложкой GaSb, рассогласование параметра решетки $\Delta a/a < 10^{-3}$.

На основе полученных гетероструктур методом стандартной фотолитографии создавались меза-диоды с диаметром чувствительной площадки $300\text{--}500\ \mu\text{m}$. Исследование вольт-амперных характеристик проводилось при помощи измерителя Keithley 2400, а вольт-емкостных характеристик осуществлялось C - V -анализатором KEITHLEY 590/1M. Для изучения электрических характеристик при различных температурах использовался криостат Janis CCS-150, позволяющий выполнить измерения в диапазоне температур $10\ \text{K}\text{--}360\ \text{K}$. Данные измерений собирались через стандартный интерфейс IEEE-488, обрабатывались и записывались в память компьютера автоматически.

Были проведены исследования вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик p -GaSb/ p -GaInAsSb/ N -GaAlAsSb гетероструктур при различных температурах. Измеренные вольт-фарадные (C - V) характеристики удовлетворительно описываются зависимостью $C^{-2} \sim V$, типичной для резкого гетероперехода. Слой объемного заряда (обедненная область) сосредоточен, в основном, в узкозонной активной области, и

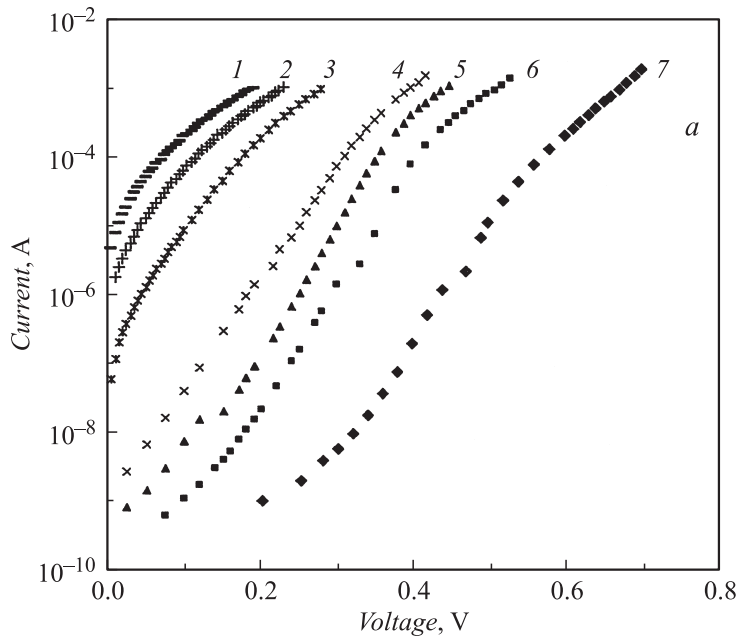


Рис. 1. *a* — вольт-амперная характеристика фотодиодной $p\text{-GaSb}/p\text{-GaInAsSb}/N\text{-GaAlAsSb}$ гетероструктуры при прямом смещении. Температура, T , К: 1 — 357, 2 — 326, 3 — 300, 4 — 214, 5 — 186, 6 — 156, 7 — 80. *b* — коэффициент неидеальности β в зависимости от температуры.

его ширина составляет, по нашим оценкам, $W_0 = (2-5) \cdot 10^{-5}$ см без смещения. Вычисления концентрации носителей в активной области дают величину $(2-6) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) были исследованы в диапазоне температур от 80 К до 360 К. Анализ прямых ветвей ВАХ (рис. 1, *a*) показал, что для $p\text{-GaSb}/p\text{-GaIn}_{0,22}\text{AsSb}/N\text{-GaAl}_{0,34}\text{AsSb}$ гетероструктуры ток через переход как функция приложенного напряжения описывается следующим выражением:

$$I = I_0 \exp(eV/\beta kT), \quad (1)$$

где e — заряд электрона, V — напряжение на диоде, k — постоянная Больцмана, T — температура, β — коэффициент неидеальности.

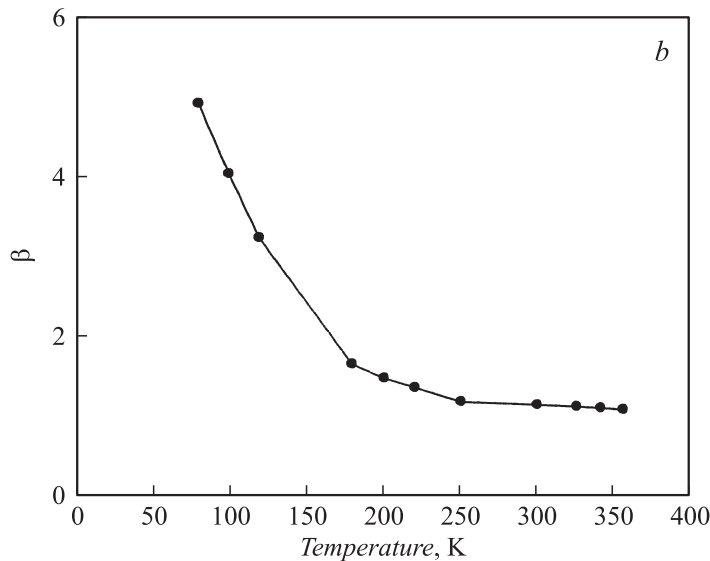


Рис. 1 (продолжение).

Коэффициент неидеальности β возрастает с уменьшением температуры: от $\beta = 1.1$ в диапазоне температур $T = 360\text{--}300$ К до $\beta = 4.9$ при $T = 80$ К (см. рис. 1, *b*). В температурных диапазонах от 360 до 230 К и от 230 до 160 К протекание тока определяется различными механизмами — диффузионным и рекомбинационным, соответственно. При низких температурах ($T \leq 150$ К) становится существенным вклад туннельного тока. Это подтверждается слабой зависимостью прямого тока от температуры в данном температурном диапазоне.

На рис. 2, *a* представлены обратные ветви вольт-амперных характеристик при различных температурах. В температурном диапазоне $T = 230\text{--}360$ К и при напряжениях $V = -(1\text{--}4)$ В, обратный темновой ток определяется генерацией носителей в обедненной области и может быть представлен зависимостью:

$$I = \frac{en_iWA}{\tau_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

где n_i — собственная концентрация носителей для твердого раствора $\text{GaIn}_{0.22}\text{AsSb}$, W — ширина слоя объемного заряда при заданном

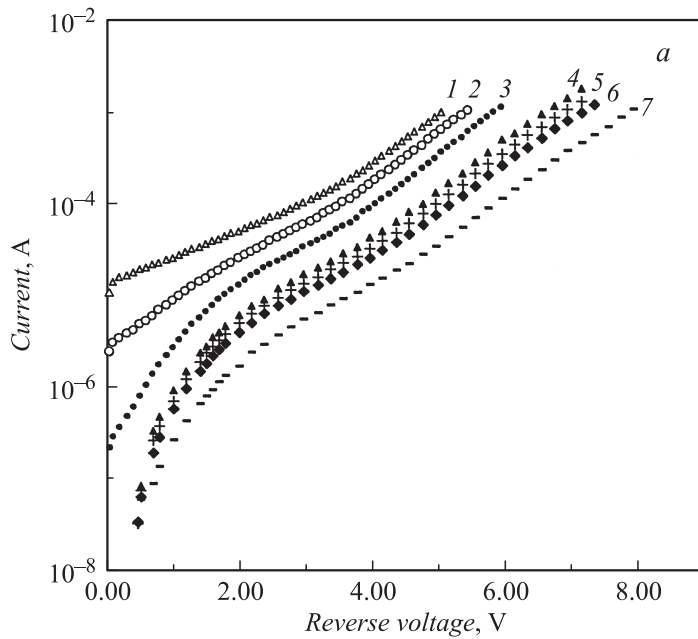


Рис. 2. *a* — вольт-амперная характеристика фотодиодной $p\text{-GaSb}/p\text{-GaInAsSb}/N\text{-GaAlAsSb}$ гетероструктуры при обратном смещении. Температура, T , К: 1 — 357, 2 — 326, 3 — 300, 4 — 214, 5 — 186, 6 — 156, 7 — 80. *b* — зависимость обратного темного тока от приведенной температуры. Обратное смещение, V : 1 — 2, 2 — 1, 3 — 0.5, 4 — зависимость генерационно-рекомбинационного тока от приведенной температуры $I \sim T^{3/2} \exp(-E_g/2kT)$.

напряжении, A — площадь гетероструктуры, τ_{eff} — эффективное время жизни носителей. Эффективное время жизни носителей, оцененное по величинам темного тока, составило $\tau_{\text{eff}} = (6-9) \cdot 10^{-8}$ с.

На рис. 2, *b* показана зависимость обратного темного тока от величины $10^3/T$ при различных напряжениях смещения. Определенная из данной зависимости в диапазоне температур $T = 230-360$ К и при $V = -1$ В энергия активации составила $E_A = 0.26 \pm 0.02$ эВ, что близко к половине ширины запрещенной зоны узкозонного твердого раствора GaInAsSb в активной области гетероструктуры. Полученное

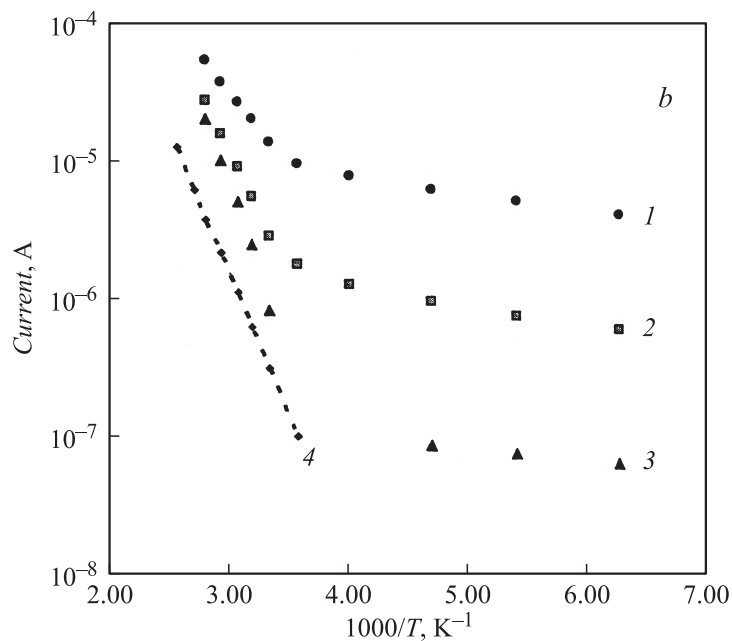


Рис. 2 (продолжение).

значение энергии активации является доказательством определяющей роли генерационного механизма протекания темнового тока. Теоретическая [7] температурная зависимость генерационно-рекомбинационного (GR) темнового тока также представлена на рис. 2, *b*. Видно, что экспериментальные данные согласуются с GR зависимостью, которую можно представить выражением:

$$I \sim T^{3/2} \exp(-E_g/2kT). \quad (3)$$

Здесь E_g — ширина запрещенной зоны и T — абсолютная температура, соответственно.

Отклонение экспериментальной зависимости от теоретической обусловлено возрастающим влиянием туннельной компоненты темнового тока. Эта компонента тока слабее зависит от температуры и имеет решающее влияние в прямозонных узкозонных материалах при низких

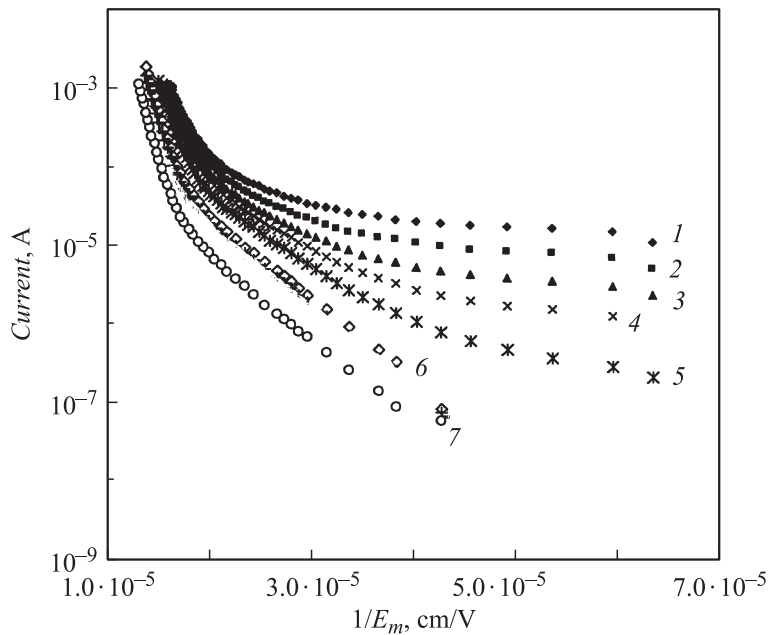


Рис. 3. Зависимость обратного темнового тока от приведенной величины максимальной напряженности электрического поля гетероперехода. Температура, T, K : 1 — 357, 2 — 342, 3 — 326, 4 — 314, 5 — 300, 6 — 214, 7 — 80.

температурах или при больших обратных смещениях [8]. Наши оценки показывают, что при температурах, близких к комнатной, преобладание туннельного механизма происходит при обратных смещениях $V > 5 V$, а при низких температурах во всем диапазоне обратных смещений. Данный вывод подтверждается слабой температурной зависимостью тока при обратных смещениях $V > 5 V$.

Для дальнейшего подтверждения туннельной модели токопереноса, вольт-амперные характеристики образцов были использованы для получения зависимости тока от обратной величины напряженности максимального значения электрического поля в гетеропереходе ($1/E_m$) при фиксированных значениях E_g , показанной на рис. 3. Следует отметить, что для прямозонных полупроводников зависимость тун-

нельного тока сильно зависит от отношения $E_g^{3/2}/E_m$. Следовательно, данный механизм может быть представлен близкой к экспоненциальной зависимостью тока от приложенного напряжения. Напряженность электрического поля гетероперехода может быть найдена с использованием экспериментальных данных из выражения [9]: $E_m = [2eN_d(V_{bi} - V)/\epsilon_2]^{1/2}$, здесь N_d — концентрация доноров, ϵ — диэлектрическая проницаемость материала и V_{bi} — встроенный потенциал p - n -гетероперехода. Результаты демонстрируют значительное отклонение в слабых электрических полях, которое увеличивается при высоких температурах. Такое поведение показывает, что туннельная компонента становится доминирующей в сильных полях и при низких температурах. Напряжение пробоя для данных структур, определенное при обратном темновом токе $2 \cdot 10^{-3}$ А, лежит в интервале 10–15 В при $T = 80$ К.

Исследование темновых токов в p -GaSb/ p -GaInAsSb/ N -GaAlAsSb гетеропереходах показало, что при высоких температурах и небольших прямых смещениях преобладает диффузионный механизм темнового тока, в то время как генерационно-рекомбинационный механизм прохождения тока является преимущественным при промежуточных температурах. При низких температурах ($T \leq 150$ К) туннельный механизм токопрохождения является доминирующим как в прямом, так и обратном направлениях смещения. Исследования механизмов прохождения тока в гетероструктурах p -GaSb/ p -GaInAsSb/ N -GaAlAsSb закладывают базис в изготовление высокоэффективных быстродействующих с низкими значениями темновых токов фотодиодов для спектрального диапазона 1.5–3.0 μm .

Работа частично выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-02-01359а).

Список литературы

- [1] *Mikhaylova M.P., Stoyanov N.D., Andreev I.A.* et al. // Proc. SPIE. 6585. Editors: Baldini F., Homola J., Lieberman R., Miler M., 2007. P. 658526-(1–9).
- [2] *Pirson R.N., Fletcher A.N.* et al. // Analytical Chemistry. 1956. V. 28. P. 1228.
- [3] *Troy T.L., Thennadil S.N.* // J. Biomedical Optics. 2001. V. 6. N 2. P. 167.
- [4] *Kincade K.* // Laser Focus World. December 2003. P. 69–72.

- [5] *Srivastava A.K., Zyskind J.L., Lum R.M.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1986. V. 49. P. 41.
- [6] *Kunitsyna E.V., Andreev I.A., Mikhailova M.P.* et al. // *Proc. SPIE.* 4340. Photoelectronics and Night Vision Devices. Ed. by Filachev A.M. 2000. P. 244–253.
- [7] *Margaritondo G.* // *Electronic Structure of Semiconductor Heterojunctions* (Acad. Publish.). 1988. P. 336.
- [8] *Moll J.L.* // *Physics of Semiconductors* N.Y.: McGraw Hill, 1964.
- [9] *Milnes A., Feucht D.L.* // *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions* New York: Acad. Press, 1972.