

06

InAsSbP/InAs гетероструктуры для термофотовольтаических преобразователей: получение и свойства

© В.А. Геворкян, В.М. Арутюнян, К.М. Гамбарян, И.А. Андреев,
Л.В. Голубев, Ю.П. Яковлев

Ереванский государственный университет

E-mail: vgev@ysu.am

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

E-mail: igor@iropt9.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 1 мая 2007 г.

Выращивание узкозонных соединений арсенида индия методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) развито для термофотовольтаических применений. Многокомпонентные твердые растворы на основе InAs и их гетероструктуры InAs/InAsSbP ($E_g = 0.35\text{--}0.6\text{ eV}$) перспективны для температур эмиттеров излучения $1000\text{--}2000^\circ\text{C}$. Продление чувствительности элементов в длинноволновую область до $3.8\ \mu\text{m}$ позволяет эффективно использовать фотоны малой энергии. Пленки четверных твердых растворов InAsSbP/InAs, полученных методом ЖФЭ из переохлажденного раствора–расплава и методом электро-ЖФЭ с подпиткой ростового раствора–расплава компонентами выращиваемого слоя, имеют однородный состав и высокое совершенство кристаллической структуры. Значения обратных токов насыщения для гетероструктур $n\text{-InAs}/p\text{-InAsSpP}$ близки к теоретическим.

PACS: 84.60.Rb, 81.15.Lm

Оптимальная ширина запрещенной зоны (E_g) для термофотовольтаического (ТФВ) элемента находится в области энергий фотонов, соответствующих максимуму интенсивности излучения черного тела. При этом ТФВ элемент полезно преобразует только высокоэнергетическую часть излучения ($\hbar\omega \geq E_g$), в то время как длинноволновая часть спектра не поглощается в полупроводниковом материале ($\hbar\omega < E_g$). Для использования длинноволнового излучения применяют различные подходы: селективные фильтры, отражение от обратной зеркальной стороны ТФВ элемента. Возможен и другой подход—использование

двухкаскадных ТФВ элементов, где первый каскад преобразует фотоны с высокой энергией, а второй каскад утилизирует фотоны из низкоэнергетической части спектра. В такой ситуации источник излучения можно расположить очень близко к ТФВ элементу, обеспечив тем самым в 100–1000 раз большую плотность мощности падающего излучения. По оценкам [1,2] возможно получить электрическую мощность от 2 до 80 W/cm².

В настоящее время для температур эмиттера излучения в 1000–2000°С разработаны фотоэлектрические преобразователи на основе узкозонных твердых растворов GaInAsSb/GaSb (0.5–0.6 eV) с широкозонными „окнами“ из GaSb или AlGaAsSb (0.76–1.24 eV) [3,4]. Расчеты показывают [2], что оптимальные ширины запрещенных зон ТФВ элементов лежат в интервале 0.2–0.5 eV. Эффективность элементов может быть повышена путем использования более узкозонного твердого раствора Ga_{1-x}In_xSb_{1-y}As_y иного состава [5], но возможности вариации E_g материала ограничены областью несмешиваемости [6–8].

Перспективными для активных областей (поглощения) и/или широкозонных „окон“ становятся узкозонные твердые растворы InAsSbP/InAs. Цель данной работы — создание альтернативных ТФВ элементов на основе гетероструктур n -InAs/ p -InAs_{1-x-y}Sb_xP_y для преобразования как высоко-, так и низкоэнергетического теплового излучения.

ТФВ структуры выращивались методами жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и электрожидкофазной эпитаксии (ЭЖФЭ). Нами применялась новая разновидность ЭЖФЭ с контролируемой подпиткой ростового раствора–расплава (Р–Р) компонентами выращиваемого слоя [9]. Для подпитки Р–Р использовался один „жидкий источник“, представляющий собой отдельный Р–Р, насыщенный компонентами выращиваемого твердого раствора. При пропускании электрического тока заданной величины и полярности через кристаллизационную ячейку происходит электроперенос компонентов жидкого источника в ростовой Р–Р. Фазовое равновесие Р–Р смещается в сторону его пересыщения, и происходит рост пленки на подложке. При заданном значении тока и времени его пропускания количество каждой компоненты, поступающей в ростовой Р–Р, зависит от ее электроподвижности и концентрации в жидком источнике. Отсюда следует, что при использовании только одного жидкого источника в ростовом Р–Р будет увеличиваться концентрация компоненты с большей электроподвижностью. Для соединения

InAsSbP в расплаве индия электроподвижность P превышает в два раза электроподвижность As, а электроподвижность Sb близка к нулю. Следовательно, можно выращивать пленки InAsSbP с постоянным или увеличивающимся по направлению роста содержанием фосфора. При выращивании InAsSbP методом ЖФЭ и понижении температуры содержание фосфора уменьшается по направлению роста и соответственно уменьшается E_g слоя [10].

В качестве подложек использовались нелегированный n -InAs (100), толщиной $400 \mu\text{m}$, с концентрацией носителей заряда $n = 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ и плотностью дислокаций $N_D \leq 5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}$. Рост пленки осуществлялся в кассете пенального типа при температуре 580°C в потоке H_2 , очищенного при помощи палладиевых фильтров. Электрический контакт к обратной стороне подложки создавался с помощью расплава In, насыщенного InAs и содержащего донорную примесь (Sn или Te). После роста пленки, из данного расплава, на тыльной стороне подложки проводилась ЖФЭ n^+ -InAs контактного слоя. Изначальный состав ростового P–P определялся из диаграммы состояния четырехкомпонентного соединения InAsSbP с учетом соответствия постоянных решеток выращиваемой пленки и подложки InAs [10,11]. Жидкий источник имел тот же состав, что и состав ростового P–P. Перед процессом эпитаксии P–P выдерживался в контакте с дополнительной подложкой для получения идеального термодинамического равновесия. Затем P–P приводился в контакт с рабочей подложкой и осуществлялся рост пленки InAsSbP при постоянной температуре за счет пропускания постоянного электрического тока ($j = 2 - 4 \text{ A/cm}^2$) через ростовую ячейку.

Гетероструктуры n -InAs/ p -InAsSbP выращивались также методом ЖФЭ из пересыщенного P–P. Пересыщение создавалось за счет снижения температуры насыщенного P–P, полученного описанным выше методом. При выбранных условиях роста (температура процесса, состав жидкой фазы и др.) наиболее совершенные пленки InAsSbP толщиной $4-6 \mu\text{m}$ получались при снижении температуры насыщенного P–P на $5-10^\circ\text{C}$. Омические контакты напылялись: к подложке Au–Ge, к пленке Cr/Au, затем вжигались в атмосфере водорода.

Исследования границы раздела p -InAsSbP/ n -InAs гетероперехода, морфологии поверхности и состава пленок проводились методом сканирующей электронной микроскопии (SEM–EDX). SEM-изображение поперечного среза подложка–пленка и морфология поверхности плен-

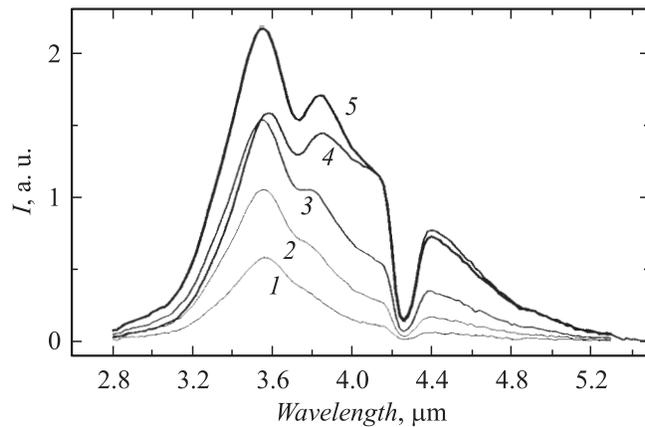


Рис. 1. Спектр электролюминесценции $p\text{-InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.04}\text{P}_{0.08}/n\text{-InAs}$ гетероструктуры при $T = 300\text{ K}$. Токи накачки I , mA: 1 — 20, 2 — 50, 3 — 100, 4 — 150, 5 — 220.

ки продемонстрировали зеркальную поверхность пленки и планарную с подложкой границу раздела. Спектры электролюминесценции $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$ при различных токах представлены на рис. 1. Пики излучения соответствуют межзонным переходам и переходам примесь—зона в InAs. Типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) $p\text{-InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.04}\text{P}_{0.08}/n\text{-InAs}$ гетероструктур для интервала температур $-20^\circ\text{C} \div +20^\circ\text{C}$ приведены на рис. 2. Экспериментальные значения темновых токов хорошо описываются зависимостью вида

$$J(V) = J_S \left[\exp \left(\frac{e(V - JR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] + \frac{V - JR_S}{R_{Sh}}, \quad (1)$$

где J — ток через диод, J_S — ток насыщения, V — напряжение на диоде, n — коэффициент неидеальности, k — постоянная Больцмана, T — температура, R_{Sh} — шунтирующее сопротивление, R_S — сопротивление базы и контактов.

Аппроксимация экспериментальных данных зависимостью (1) дает следующие значения параметров гетеродиодов при температуре $t = +20^\circ\text{C}$: $J_S = 0.37\text{ mA}$, $R_S = 2\ \Omega$, $R_{Sh} = 2500\ \Omega$. Контактная разность потенциалов p – n -перехода V_k при этом составила величину

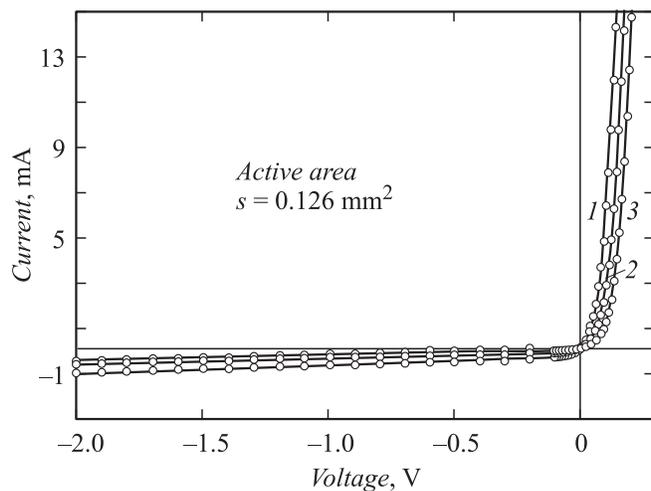


Рис. 2. Темновая вольт-амперная характеристика ТФВ диодной меза-структуры $n^+-\text{InAs}/n\text{-InAs}/p\text{-InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.04}\text{P}_{0.08}$. Температура (t): 1 — +20, 2 — 0, 3 — -20°C .

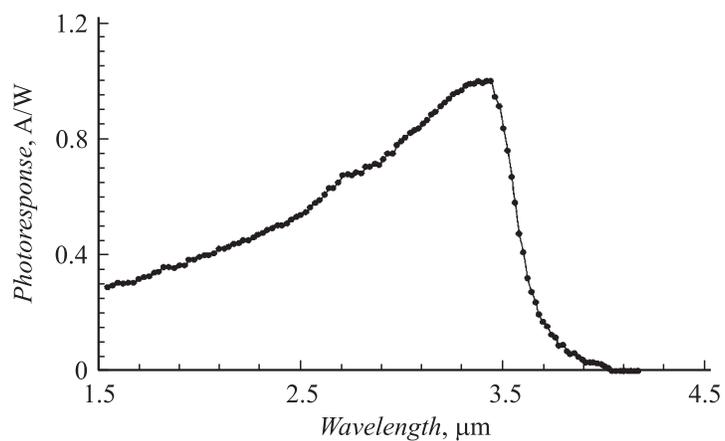


Рис. 3. Спектральная зависимость фототока короткого замыкания $p\text{-InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.04}\text{P}_{0.08}/n\text{-InAs}$ ТФВ структуры. $T = 300\text{ K}$.

$V_k = 0.14$ В. Измерения показывают, что коэффициент неидеальности диода близок к 1, что есть свидетельство диффузионного механизма токопрохождения в $p-n$ -переходе. Близкие значения расчетного ($I_S \approx 15 \cdot 10^{-2}$ А/см²) и экспериментального ($I_S = 29 \cdot 10^{-2}$ А/см²) токов насыщения при $t = +20^\circ\text{C}$ — свидетельство хорошего качества гетероструктур.

Спектральная зависимость тока короткого замыкания n -InAs/ p -InAs_{0.88}Sb_{0.04}P_{0.08} диодной структуры приведена на рис. 3. Видно, что структуры имеют широкую область спектральной чувствительности, определяемую ширинами запрещенных зон InAs и твердого раствора InAs_{0.88}Sb_{0.04}P_{0.08}. Длинноволновой край спектральной чувствительности на уровне 10% составил величину $3.8 \mu\text{m}$. Измеренная монохроматическая ампер-ваттная чувствительность в максимуме показала значения $1.1-1.4$ А/Вт, что соответствует внутренней квантовой эффективности в $40-50\%$ с учетом потерь на отражение ($\sim 30\%$).

Показано, что пленки InAsSbP, полученные на подложке InAs методом ЖФЭ из переохлажденного P-P и методом ЭЖФЭ с подпиткой ростового P-P компонентами выращиваемого слоя, имеют однородный состав и высокое совершенство кристаллической структуры. Значения обратных токов насыщения ТФВ гетероструктур n -InAs/ p -InAs_{0.88}Sb_{0.04}P_{0.08}, полученных данными технологическими методами, близки к теоретическим величинам. Показано, что структуры обладают широкой областью спектральной фоточувствительности (красная граница $\lambda_{th} = 3.8 \mu\text{m}$), что делает их весьма перспективными для создания ТФВ элементов с низкотемпературными источниками излучения.

Работа выполнена в рамках IPP-CRDF Проекта ARP-2-10831-YE-04, а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-08-50200а).

Список литературы

- [1] *Coutts T.J., Wanlass M.W., Ward J.S. et al. // Proc. 25th IEEE Photovolt. Specialists Conf. Washington, USA, 1966. p. 25.*
- [2] *Cody G.D. // Thermophotovoltaic Generation of Electricity; Fourth NREL Conf. 1999. P. 58.*
- [3] *Andreev V.M., Khvostikov V.P., Larionov V.R. et al. // Conference Record 26th IEEE PVSC. Anaheim, 1997. P. 935-939.*

- [4] *Hitchcock C.W., Gutmann R.J., Ehsani H. et al. // J. of Crystal Growth. 1998. V. 195. P. 363–372.*
- [5] *Mauk M.G., Shellenbarger Z.A., Cox J.A. et al. // J. of Crystal Growth. 2000. V. 211. P. 189–193.*
- [6] *Гусейнов А.А., Литвак А.М., Чарыков Н.А., Яковлев Ю.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 12. С. 67–73.*
- [7] *Баранов А.Н., Литвак А.М., Чарыков Н.А., Шерстнев В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 5. С. 33–39.*
- [8] *Андреев И.А., Куницына Е.В., Михайлова М.П., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1999. Т. 33. В. 2. С. 249–253.*
- [9] *Gevorkyan V.A. // J. of Crystal Growth. 2003. V. 249. P. 149–158.*
- [10] *Wilson M.R., Krier A., Mao Y. // J. of Electron. Materials. 1996. V. 25. N 9. P. 104–108.*
- [11] *Wang C.A., Choi H.K., Ransom S.L. et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 1305.*