

Спектральные и электрические свойства светодиодных гетероструктур с активной областью на основе InAs

© А.А. Семакова¹, А.М. Смирнов¹, Н.Л. Баженов², К.Д. Мынбаев², А.А. Пивоварова²,
А.В. Черняев^{2,3,4}, С.С. Кижаяев³, Н.Д. Стоянов³

¹ Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ ООО „Микросенсор Технолоджи“,
194223 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Военная академия связи им. С.М. Буденного,
194064 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: antonina.semakova@itmo.ru

Поступила в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 15 апреля 2021 г.

Принята к публикации 15 апреля 2021 г.

Приведены результаты исследований оптических и структурных свойств эпитаксиальных слоев InAs, выращенных на подложке *n*-InAs, и спектральных и электрических свойств светоизлучающих гетероструктур с активным слоем из InAs и различным дизайном и химическим составом барьерных слоев. Исследования свойств гетероструктур проведены в диапазоне 4.2–300 К. Показано влияние степени легирования подложки и свойств интерфейсов в гетероструктурах на вид их спектров излучения и мощностные характеристики. Исследованы механизмы протекания тока через гетероструктуры, и показано преобладание диффузионной составляющей тока при температурах выше 200 К и присутствие туннельной составляющей при более низких температурах.

Ключевые слова: InAs, гетероструктуры, люминесценция, рекомбинация.

DOI: 10.21883/FTP.2021.08.51139.9664

1. Введение

Средневолновый инфракрасный (ИК) диапазон (длины волн 3–5 мкм) используется в спектроскопии газов и молекул, в медицине, а также для решения задач обнаружения взрывчатых веществ и мониторинга окружающей среды. В связи с растущим спросом на оптоэлектронные приборы, работающие в этом диапазоне, увеличивается потребность в светоизлучающих диодах (СД) на основе узкощелевых полупроводников $A^{III}B^V$, служащих базой для таких устройств [1–4]. Наиболее распространенным материалом для создания активной области СД средневолнового ИК-диапазона является арсенид индия (InAs). Источники спонтанного излучения на основе InAs изготавливаются на основе двойных [5] и одиночных [6] гетероструктур (ГС), и для создания барьерного слоя в таких структурах часто используется твердый раствор InAsSbP. Данный выбор определен возможностью выращивания широкозонного (с шириной запрещенной зоны E_g до 0.7 эВ [7]) барьерного слоя, согласованного по параметру решетки с подложкой InAs, что обуславливает хорошую локализацию инжектированных носителей заряда в активной области и позволяет эффективно выводить излучение из ГС. Вывод излучения также может осуществляться через сильно легированную подложку InAs *n*-типа проводимости.

К настоящему моменту разработаны различные конструкции СД на основе InAs — с иммерсионными линзами [8], объемным резонатором [9], оптической накачкой [10], а также вариации стандартных СД с плоской поверхностью и точечным верхним контактом. Повышение эффективности СД требует детального изучения их свойств не только при рабочей температуре, обычно комнатной, но и при более низких температурах [11]. Недавно мы сообщали о результатах предварительных исследований характеристик нескольких ГС с активным слоем из InAs, проведенных при 300 К [12]. В настоящей работе представлены расширенные результаты исследований свойств шести ГС с активным слоем из InAs с различным дизайном и составом барьерных слоев, проведенных в интервале температур $T = 4.2–300$ К.

2. Методика эксперимента

ГС были выращены методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) в компании „ЛЕД Микросенсор“ по методике, аналогичной изложенной в работе [13]. Для пяти ГС на подложке *n*-InAs, легированной серой, выращивался нелегированный активный слой InAs толщиной 2.5 мкм с концентрацией электронов $n \approx 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Поверх активного слоя выращивался широкозонный барьерный слой, ле-

Параметры исследованных гетероструктур

ГС	Концентрация носителей заряда в подложке, см^{-3}	Барьерный слой	
		Химический состав	E_g , эВ ($T = 300 \text{ K}$)
A, B	$5 \cdot 10^{18}$	$\text{InAs}_{0.25}\text{Sb}_{0.25}\text{P}_{0.50}$	0.61
C	$2 \cdot 10^{18}$	$\text{InAs}_{0.15}\text{Sb}_{0.31}\text{P}_{0.54}$	0.64
D	$2 \cdot 10^{18}$	$\text{InAs}_{0.31}\text{Sb}_{0.23}\text{P}_{0.46}$	0.58
E	$2 \cdot 10^{18}$	$\text{InAs}_{0.21}\text{Sb}_{0.22}\text{P}_{0.57}$	0.62
F	$5 \cdot 10^{18}$	$\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.77}\text{Sb}_{0.22}\text{As}_{0.78}$	0.43

гированный акцепторной примесью (цинком). Составы барьерных слоев и рассчитанные согласно данным работы [7] величины их E_g приведены в таблице. По химическому составу слоев ГС A и B были схожими, однако в структуре B барьерный слой был выращен между подложкой (в данном случае p -типа проводимости) и активным слоем n -InAs. Светодиодные чипы размером $0.38 \times 0.38 \text{ мм}$ создавались методом стандартной фотолитографии и жидкостного химического травления. Применялась контактная система на основе многослойной композиции $\text{Cr}-\text{Au}-\text{Ni}-\text{Au}$. На эпитаксиальной стороне ГС формировался сплошной контакт, на подложку наносился кольцевой контакт шириной 35 мкм и внутренним диаметром 200 мкм. Для ГС с подложками n -типа проводимости излучение выводилось через подложку. В образце B сплошной контакт формировался со стороны подложки, а излучение регистрировалось со стороны эпитаксиального слоя InAs. Чипы монтировались на корпуса TO-18.

Спектры электролюминесценции (ЭЛ) ГС записывались при импульсном возбуждении с частотой следования импульсов 1 кГц и длительностью импульса 1 мкс. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) записывались в аналогичных режимах при возбуждении сигнала полупроводниковым лазером с длиной волны 1.03 мкм. Сигнал люминесценции регистрировался с помощью охлаждаемого InSb-фотодиода. Запись спектров проводилась при помощи монохроматора МДР-23.

3. Результаты и обсуждение

Из таблицы видно, что в работе были использованы подложки с различным уровнем легирования. Проведенный ранее расчет показателя оптического поглощения α подложек показал, что увеличение уровня легирования с $n = 2 \cdot 10^{18}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ приводит к „голубому“ сдвигу края поглощения при $\alpha = 10^2 \text{ см}^{-1}$ на 100 мэВ [12]. Данные результаты были подтверждены при экспериментальном исследовании оптического пропускания подложек. Подложка с $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ поглощала коротковолновую часть спектра ЭЛ СД и в спектре пропускания имелся резкий спад при энергиях фотона, больших 0.32 эВ (E_g InAs при 300 К составляет

$\approx 0.35 \text{ эВ}$). Использование подложки с $n = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ позволило увеличить вывод излучения из структуры.

Кроме свойств подложек, были исследованы свойства активных слоев из InAs. На рис. 1, а представлен нормированный спектр ФЛ эпитаксиальной пленки n -InAs с $n = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ толщиной 400 нм, выращенной на подложке n -InAs без формирования барьерного слоя. Спектр записан при $T = 85 \text{ K}$ и состоит из одной полосы с максимумом при энергии фотона $h\nu = 0.409 \text{ эВ}$ и шириной на половине высоты полосы ($FWHM$) 20 мэВ. Для сравнения здесь же представлен спектр ФЛ образца из пластины монокристалла (100)InAs с близкой концентрацией электронов, $n = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Подобный материал широко используется в качестве подложек при выращивании ГС InAs(Sb)/InAsSbP с выводом излучения через широкозонный слой (см., например, [14]). Видно, что спектр образца монокристалла содержит две полосы излучения. Высокоэнергетическая полоса имеет максимум при $h\nu = 0.409 \text{ эВ}$, $FWHM$ этой полосы равна 13 мэВ. Максимум низкоэнергетической полосы соответствует энергии 0.390 эВ, $FWHM$ — 15 мэВ. На основании литературных данных [15,16] можно заключить, что низкоэнергетическая полоса рассматриваемого спектра ФЛ определяется оптическими переходами с участием акцепторных уровней вблизи потолка валентной зоны, часто наблюдаемыми в нелегированных кристаллах InAs. Высокоэнергетическая полоса спектра ФЛ монокристаллического образца и полоса излучения эпитаксиальной пленки соответствовали межзонным переходам в InAs. Уширение линии излучения в пленке относительно монокристалла незначительно. Это позволяет сделать вывод о хорошем структурном качестве исследованной пленки.

Анализ структурных свойств пленки InAs был проведен методом рентгеновской дифракции (РД). Дифрактограммы были получены с помощью установки ДРОН-8 в щелевой конфигурации с острофокусной трубкой БСВ-29 с медным анодом и сцинтилляционным детектором NaI (Тl). Спектр РД, представленный на рис. 1, б, был записан с шагом сканирования 0.05° и экспозицией без вращения. Для спектра оказались характерны пики РД при углах 2θ 29.48, 61.15 и 99.45° , отвечающие отражениям от плоскостей InAs (200), (400) и (600) соответственно. Пики при углах 2θ 26.60 и 54.74° не относились к чистому InAs; возможно, они были

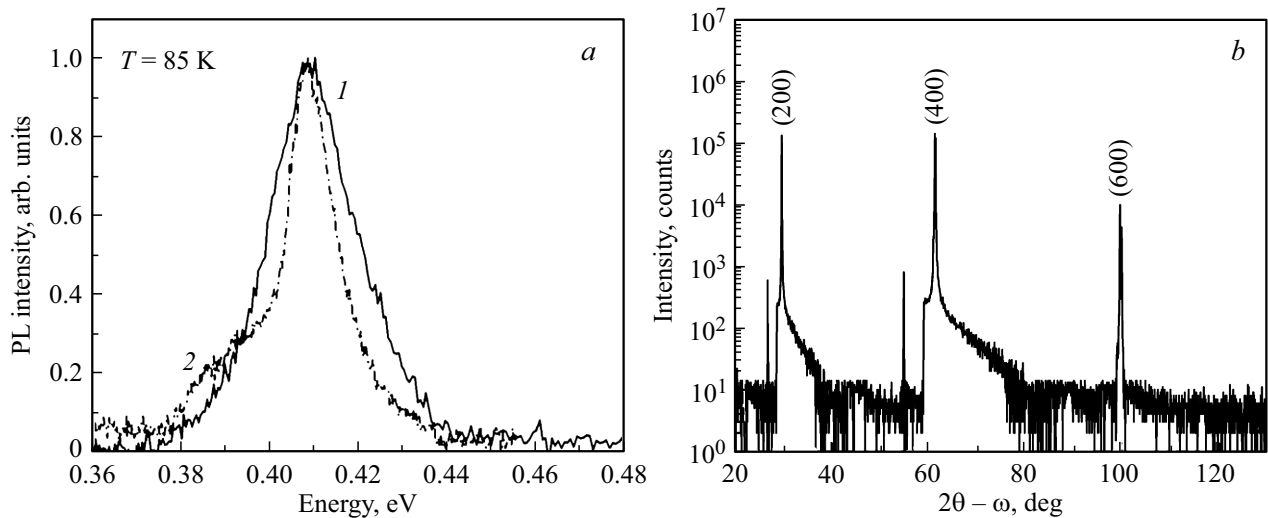


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции эпитаксиальной пленки (1) и монокристалла (2) InAs при 85 К (а) и спектр рентгеновской дифракции эпитаксиальной пленки (b).

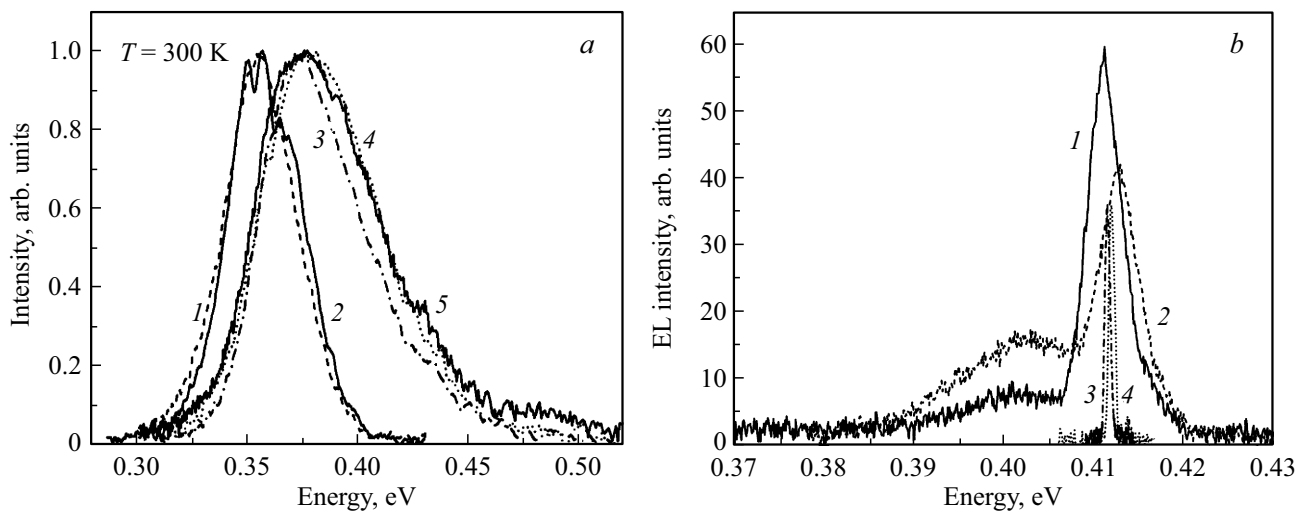


Рис. 2. Спектры электролюминесценции ГС D (1), E (2), F (3) и A (4) и фотолуминесценции эпитаксиальной пленки InAs (5) при 300 К (а), и спектры электролюминесценции ГС D (1), E (2), B (3) и F (4) при 4.2 К (b).

вызваны присутствием антимолибдсодержащей фазы (например, соответствовали дифракции от плоскостей (101) и (202) AsSb группы симметрии $R\bar{3}m$), образование которой могло быть вызвано остаточным загрязнением ростового реактора сурьмой. Для пика (400)InAs была снята кривая качания РД (не показана), $FWHM$ которой составила $\sim 2'$, что свидетельствует о высоком структурном совершенстве полученного InAs. Полуширины кривых качания РД пленок твердого раствора $InAs_{1-x}Sb_x$, выращенных и исследованных в аналогичных условиях, были существенно больше и достигали значения $30'$ при $x = 0.166$.

На рис. 2, а представлены нормированные спектры ЭЛ ряда ГС, записанные при токе инжекции $I = 1.5$ А и $T = 300$ К. Спектры ГС D и E (кривые 1 и 2) представляли собой симметричные кривые с $FWHM \sim 34$ мэВ

и максимумом при $h\nu \approx 0.35$ эВ. Спектры ЭЛ образцов ГС F и A (кривые 3 и 4) имели большую полуширину (45–50 мэВ), а максимум излучения был смещен к $h\nu \approx 0.37$ эВ. Здесь же (кривая 5) представлен нормированный спектр ФЛ эпитаксиальной пленки InAs, записанный при той же температуре 300 К; как видно, он очень близок к спектрам ЭЛ ГС F и A. Таким образом, сильно ($n = 5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$) легированная подложка обеспечивала полный выход излучения из активного слоя в отличие от слабо легированной. В результате поглощение части излучения подложкой, проявляющееся сильнее при меньшем уровне легирования последней, позволяет контролировать смещение максимума спектров и управлять их $FWHM$, что может быть полезно для „настройки“ СД на основе InAs на определенные полосы поглощения в средневолновом ИК-диапазоне.

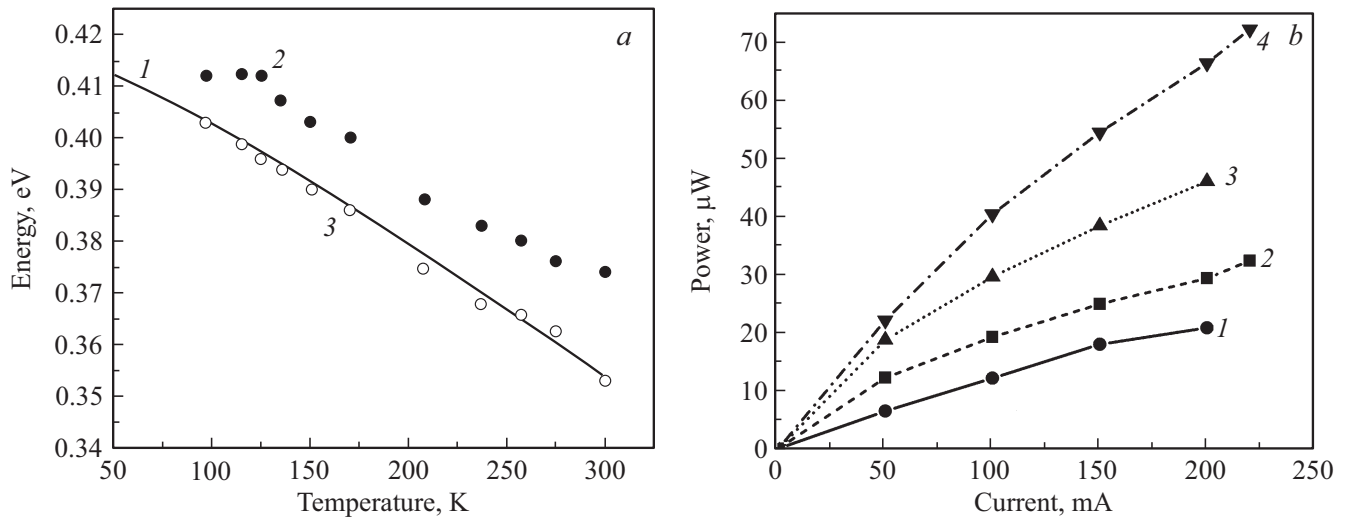


Рис. 3. Температурные зависимости расчетной E_g InAs согласно [7] (кривая 1), положения максимумов линий ЭЛ (символы 2) и значений оптической ширины запрещенной зоны E_{gopt} , определенных согласно [19] (символы 3) для ГС А (а), и ватт-амперные характеристики ГС Е (1), В (2), А (3) и F (4) при 300 К (b).

На рис. 2, b приведены спектры ЭЛ ГС D, F, E и B, записанные при $I = 0.2$ А и $T = 4.2$ К. Видно, что при низких температурах в спектрах ЭЛ структур D и E (кривые 1 и 2) присутствовало две полосы: широкая полоса спонтанного излучения I_1 с максимумом при ~ 0.40 эВ и узкая полоса „вынужденного“ излучения I_2 с максимумом при ~ 0.41 эВ; это было характерно и для ГС С. При увеличении I от 0.1 до 0.6 А наблюдался резкий рост интенсивности полосы I_1 , но не полосы I_2 . Отметим, что для структур B и F (спектры 3 и 4), а также для структуры А уже при $I = 0.2$ А наблюдалась одна узкая полоса ЭЛ. При повышении температуры (до 68–90 К) форма спектральной линии менялась, и спектры ГС определялись полосой излучения I_1 . Вынужденное излучение при низких температурах неоднократно наблюдалось в ГС на основе InAs [17,18]. Его гашение при повышении температуры и, как следствие, уменьшении E_g вызвано увеличением скорости типичного для узкощелевых полупроводников $A^{III}B^V$ оже-процесса СННС, при котором энергия рекомбинирующей электронно-дырочной пары передается дырке с переходом последней в спин-орбитально отщепленную зону. Этот эффект для исследуемых ГС обсуждался нами в работах [11,19].

На рис. 3, a представлены температурная зависимость E_g InAs, рассчитанная согласно данным работы [7] (кривая 1), и зависимость спектрального положения максимумов линий ЭЛ (символы 2), а также значений оптической ширины запрещенной зоны E_{gopt} , определенных из спектров спонтанного излучения согласно работе [19] (символы 3) для структуры А. Видно, что наблюдается хорошее согласие значений E_g и E_{gopt} , аналогичный результат был получен для структур F и B. Так как подложка с $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ затрудняла вывод излучения из ГС D, E и С и обрезала высокоэнергетическую

часть спектров ЭЛ, то подобный анализ для этих ГС не проводился, однако и для этих структур температурная зависимость энергетического положения спектрального максимума также следовала за расчетной зависимостью $E_g(T)$ для InAs. Таким образом, основным каналом излучательной рекомбинации во всех исследованных ГС являлась межзонная рекомбинация в объеме активного слоя.

На рис. 3, b представлены ватт-амперные характеристики ГС F, A, B и E, записанные при $T = 300$ К. Характеристики структур D и E, а также С и B, соответственно, были очень близки, поэтому для ГС D и С данные не приведены. Использование слабо легированной подложки оказывает влияние не только на спектральные, но и электрические характеристики гетероструктур, снижая их мощность вследствие поглощения части излучения. Наибольшей мощностью во всем рассмотренном диапазоне токов обладала структура F с меньшей (≈ 0.43 эВ), чем у следующей по мощности структуры А (≈ 0.52 эВ), величиной E_g барьерного слоя, отличающейся от других ГС химическим составом. Вероятно, более высокий барьер для электронов на гетеропереходе образуется за счет большего разрыва зон ΔE_c . Очевидно, что при рассмотрении условий электронного ограничения на границе активного и барьерного слоев большое значение имеет и качество формирующегося интерфейса.

На рис. 4, a представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) ряда исследованных ГС при $T = 300$ К. Наибольшим последовательным сопротивлением (R_s) обладала структура B ($R_s = 1.42$ Ом). Как показали эксперименты по измерению сопротивления контактов Cr–Au–Ni–Au к подложкам InAs с различными уровнями легирования, это объяснялось тем, что в данном случае кольцевой контакт формировался к нелегированному эпитаксиальному слою, в отличие от других ГС, где

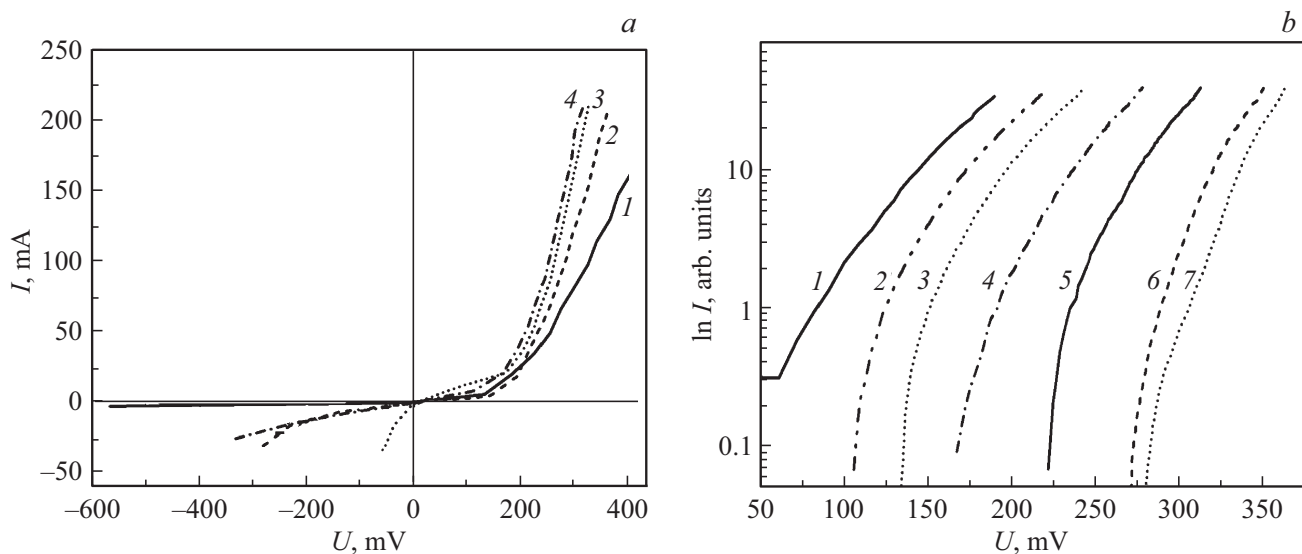


Рис. 4. ВАХ ГС В (1), А (2), F (3) и E (4) при температуре 300 К (а), и зависимости $\ln I(U)$ (b) для ГС С при температурах, К: 300 (1), 273 (2), 245 (3), 195 (4), 150 (5), 100 (6) и 77 (7).

контакт формировался к сильно легированной подложке; для них величина R_s по ВАХ составила ~ 0.5 Ом. Исследования ВАХ ГС С в диапазоне температур 4.2–300 К показали, что вид прямой ветви слабо меняется до $T = 77$ К. При дальнейшем увеличении T высота потенциального барьера уменьшалась существенно, так что прямой ток I заметно увеличивался с ростом T при неизменном прямом смещении U . Напряжение отсечки U_{co} , характеризующее высоту потенциального барьера p – n -перехода, уменьшалось с ростом температуры практически линейно, от 360 мВ при 4.2 К до 138 мВ при 300 К. На рис. 4, b приведены зависимости $\ln I(U)$ для ГС С при различных температурах. Видно, что при смещениях, больших некоторого значения, зависящего от температуры, $\ln I$ линейно увеличивается с ростом U . При этом значения $\ln I/dU$ в диапазоне температур 4.2–77 К близки. Согласно данным работы [20], подобные ВАХ характерны для туннельного механизма протекания тока. Отметим, что согласно результатам работы [21], при температурах выше 200 К в p – n -переходах на основе InAs преобладает диффузионный механизм тока, т.е. согласно теории Шокли, вид ВАХ определяет рекомбинация в n - и p -области p – n -перехода. При $T = 300$ К по мере увеличения U значение фактора идеальности η менялось от 1.03 (< 70 мВ) до 1.39 (70–150 мВ) и до 1.45 (> 150 мВ), что указывало на смешанный механизм прохождения тока: вклад вносили как диффузионная, так и рекомбинационная составляющая. При низких температурах были получены более высокие значения параметра η в сравнении со значениями, полученными при 300 К: при $T = 77$ К $\eta = 2.04$, а при $T = 4.2$ К $\eta = 9.45$. Таким образом, в данном случае большую роль играли процессы туннелирования.

4. Заключение

В работе исследованы фотолюминесценция и рентгеновская дифракция эпитаксиальных слоев InAs, выращенных на подложке n -InAs, а также электролюминесценция, вольт-амперные и ватт-амперные характеристики гетероструктур с активной областью на основе слоев InAs в интервале температур 4.2–300 К. Показана возможность сдвига пиковой длины волны и изменения ширины спектра излучения светодиода путем изменения степени легирования подложки. Исследованы механизмы протекания тока, показано преобладание диффузионной составляющей тока при температурах > 200 К и присутствие туннельной составляющей при более низких температурах.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90091.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Jung, S. Bank, M.L. Lee, D. Wasserman. *J. Opt.*, **19**, 123001 (2017).
- [2] C.L. Tan, H. Mohseni. *Nanophotonics*, **7**, 169 (2018).
- [3] С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный. *ФТП*, **53**, 147 (2019).
- [4] М.П. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **53**, 291 (2019).

- [5] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Н.М. Стусь. ФТП, **23**, 592 (1989).
- [6] B.A. Matveev, N.V. Zotova, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, M.A. Remenyi, N.M. Stus', A.P. Kovchavtsev, G.L. Kuryshev, V.G. Polovinkin. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **891**, 9 (2006).
- [7] S. Adachi. J. Appl. Phys., **61**, 4869 (1987).
- [8] V.A. Markov, A.V. Semench, M.V. Kurushkin, D.V. Kurushkin, V.A. Klinkov, A.A. Petukhov. Infr. Phys. Technol., **78**, 167 (2016).
- [9] A. Green, D. Gevaux, C. Roberts, C. Philips. Physica E, **20**, 531 (2004).
- [10] Ю.М. Задиранов, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова. Письма ЖТФ, **34** (10), 1 (2008).
- [11] К.Д. Мынбаев, Н.Л. Баженов, А.А. Семакова, М.П. Михайлова, Н.Д. Стоянов, С.С. Кизжаев, С.С. Молчанов, А.П. Астахова, А.В. Черняев, Н. Lipsanen, В.Е. Бугров. ФТП, **51**, 247 (2017).
- [12] А.А. Семакова, С.Н. Липницкая, К.Д. Мынбаев, Н.Л. Баженов, С.С. Кизжаев, А.В. Черняев, Н.Д. Стоянов, Н. Lipsanen. Письма ЖТФ, **46** (3), 51 (2020).
- [13] M. Soranen, T. Koljonen, H. Lipsanen, T. Tuomi. J. Cryst. Growth, **145**, 492 (1994).
- [14] A.A. Semakova, V.V. Romanov, K.D. Moiseev, N.L. Bazhenov, K.D. Мынбаев. J. Phys. Conf. Ser., **1482**, 012023 (2020).
- [15] Н.П. Есина, Н.В. Зотова. ФТП, **14**, 316 (1980).
- [16] Y. Lacroix, S.A. Tran, S.P. Watkins, M.L.W. Thewalt. J. Appl. Phys., **80**, 6416 (1996).
- [17] Е.А. Гребенщикова, Н.В. Зотова, С.С. Кизжаев, С.С. Молчанов, Ю.П. Яковлев. ЖТФ, **71** (9), 58 (2001).
- [18] B. Matveev, N. Zotova, N. Il'inskaya, S. Karandashev, N. Stus'. Phys. Status Solidi C, **2**, 927 (2005).
- [19] K.D. Мынбаев, N.L. Bazhenov, A.A. Semakova, A.V. Chernyaev, S.S. Kizhaev, N.D. Stoyanov, V.E. Bougrov, H. Lipsanen, Kh.M. Salikhov. Infr. Phys. Technol., **85**, 246 (2017).
- [20] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. Полупроводниковые гетеропереходы, пер. с англ. под ред. Ю.В. Гуляева (М., Сов. радио, 1979).
- [21] A. Krier, Y. Mao. Infr. Phys. Technol., **38**, 397 (1997).

Редактор А.Н. Смирнов

Spectral and electrical properties of LED heterostructures with InAs-based active layer

A.A. Semakova¹, A.M. Smirnov¹, N.L. Bazhenov², K.D. Мынбаев², A.A. Pivovarova², A.V. Chernyaev^{2,3,4}, S.S. Kizhaev³, N.D. Stoyanov³

¹ ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

³ Microsensor Technology,
194223 St. Petersburg, Russia

⁴ Budyonny Military Academy of the Signal Corps,
194064 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of the study of optical and structural properties of epitaxial InAs layers grown on an *n*-InAs substrate, and spectral and electrical properties of light-emitting diode (LED) heterostructures with an InAs active layer and various design and chemical composition of barrier layers are presented; the properties of heterostructures were studied in the temperature range 4.2–300 K. A significant influence of the degree of substrate doping and the properties of heterointerfaces on the form of emission spectra and power characteristics of heterostructures is shown. The mechanisms of the carrier transport are studied, and the prevalence of the diffusion component of the current at temperatures above 200 K and the presence of the tunneling component at lower temperatures are shown.