

# Высокотемпературная интерфейсная электролюминесценция в разьединенных гетероструктурах II рода на основе квантовых штрихов InSb в матрице *n*-InAs

© В.В. Романов, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев<sup>†</sup>

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

(Получена 23 октября 2013 г. Принята к печати 11 ноября 2013 г.)

Впервые в гетероструктурах II рода на основе квантовых штрихов InSb, помещенных в узкозонную матрицу *n*-InAs, наблюдалась электролюминесценция при комнатной температуре. В исследуемых наногетероструктурах наблюдалась положительная люминесценция в интервале длин волн 3–4 мкм, обусловленная интерфейсными излучательными переходами электронов из самосогласованных квантовых ям на стороне матричных слоев InAs через разьединенную гетерограницу II рода InSb/InAs на уровне размерного квантования дырок в квантовых штрихах InSb, расположенные в запрещенной зоне матрицы вблизи дна зоны проводимости InAs.

## 1. Введение

Полупроводниковые наногетероструктуры на основе объектов пониженной размерности (квантовых точек, квантовых штрихов и др.), полученные в системе узкозонных соединений InAs–InSb, могут представлять интерес для создания оптоэлектронных приборов среднего инфракрасного диапазона 3–5 мкм [1,2]. Однако получение интенсивной электролюминесценции при температуре вблизи комнатной и выше является актуальной задачей для узкозонных гетероструктур. В 0-мерных нанобъектах локализация волновой функции происходит во всех трех направлениях и, следовательно, существенно уменьшается скорость термической генерации носителей заряда вследствие сильной дискретности энергетического спектра. Кроме того, локализованные состояния квантовых точек и квантовых штрихов должны характеризоваться бóльшим временем жизни неравновесных носителей заряда по сравнению с системами более высокой размерности вследствие подавления процессов рассеяния на фонах, что позволит продвинуться в область высоких рабочих температур. Ранее было показано, что наличие по крайней мере одного слоя квантовых точек толщиной несколько нанометров может существенно влиять на свойства объемной матрицы, в которую они помещены [3]. Гетероструктуры со слоями квантовых точек InSb со средним размером 4 нм в высоту в матрице InAs были получены с помощью комбинированной технологии на основе методов жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ). Первые данные по квантовым точкам InSb, выращенным в матрице InAs в едином процессе при использовании метода МОГФЭ, появились только в 2012 г. [4]. Спектры фотолюминесценции, полученные при низких температурах (до 77 К), для структур, содержащих один слой квантовых точек, имели одиночную полосу излучения с максимумом интен-

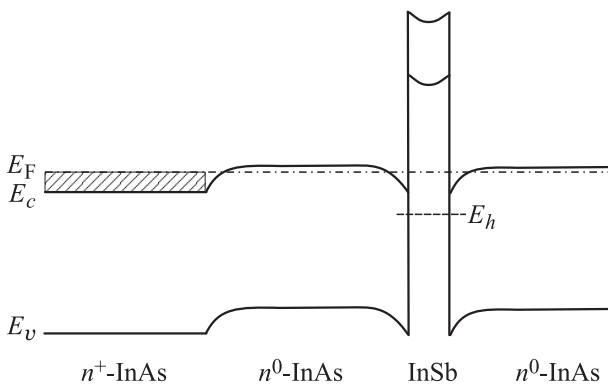
сивности вблизи длины волны  $\lambda = 3.8$  мкм. Увеличение количества слоев квантовых точек до 10 влияло только на интенсивность фотолюминесценции и почти не отражалось на спектральном положении полосы излучения, при этом данные по структурным свойствам полученных квантовых точек не были представлены. Также до настоящего времени электролюминесцентные свойства узкозонных гетероструктур, содержащих одиночный слой нанобъектов InSb в матрице InAs и полученных в едином процессе методом МОГФЭ, не исследовались. В настоящей работе представлены результаты исследований электрических и электролюминесцентных свойств гетероструктур на основе одиночного слоя квантовых штрихов InSb, помещенного в предварительно не легированную матрицу *n*-InAs.

## 2. Структуры для измерений и методика экспериментов

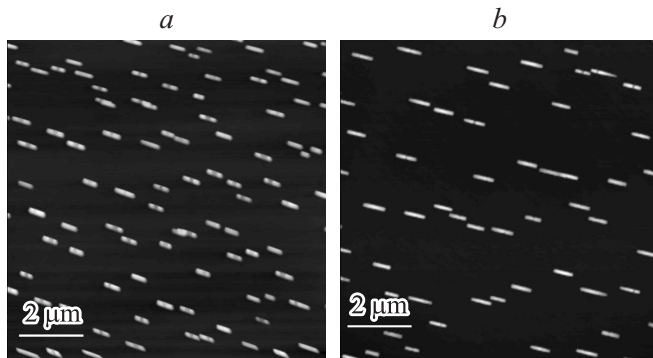
Для проведения исследований была выращена типичная наногетероструктура, содержащая одиночный слой квантовых штрихов InSb, помещенный в матрицу *n*<sup>0</sup>-InAs, представляющую собой эпитаксиальные слои преднамеренно не легированного арсенида индия. Эпитаксиальное наращивание проводилось методом МОГФЭ в стандартном реакторе горизонтального типа при атмосферном давлении на подложке *n*<sup>+</sup>-InAs(001) типа „epi-ready“, легированной серой до концентрации свободных электронов  $n = 2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Энергетическая зонная диаграмма исследуемой гетероструктуры SN-2.2 в термодинамическом равновесии приведена на рис. 1.

Режимы наращивания слоев матрицы арсенида индия были одинаковы, осаждение нижнего и верхнего эпитаксиальных слоев *n*-InAs проводилось при температуре 470°С. В качестве источника индия использовался триметилиндий (TMIIn), а в качестве источника мышьяка применялось металлоорганическое соединение третбутиларсин (tBAs), которое позволяло получать

<sup>†</sup> E-mail: mkd@iropt2.ioffe.rssi.ru



**Рис. 1.** Зонная энергетическая диаграмма наногетероструктуры II рода с квантовыми штрихами InSb, помещенными в матрицу InAs, в термодинамическом равновесии. Штриховая линия — предполагаемое расположение уровня размерного квантования для дырок ( $E_h$ ) в квантовом штрихе InSb.  $E_c$  — край зоны проводимости,  $E_v$  — край валентной зоны,  $E_F$  — уровень Ферми.



**Рис. 2.** АСМ-изображения участков  $10 \times 10$  мкм незаряженных квантовых штрихов InSb, полученных на подложке „epi-ready“  $n^+$ -InAs(001) (a) и на эпитаксиальном слое  $n^0$ -InAs, осажденном на подложке „epi-ready“  $n^+$ -InAs(001) (b), при температуре эпитаксии  $440^\circ\text{C}$  и скорости подачи TMIIn в реактор 8 мкмоль/мин при соотношении  $[\text{TMSb}]/[\text{TMIIn}] = 40$ .

твердые растворы на основе арсенида индия при низких температурах эпитаксии ( $< 510^\circ\text{C}$ ) [5]. Соотношение реагентов в газовой фазе при осаждении InAs составляло  $[\text{tVAs}]/[\text{TMIIn}] = 9$ . Все слои, осажденные в процессе эпитаксии, преднамеренно не легировались, и концентрация электронов в них не превышала  $n = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Толщина матричных слоев составляла  $\sim 0.4$  мкм.

В качестве источников индия и сурьмы для получения квантовых штрихов InSb использовались металлоорганические соединения TMIIn и триметилстибин (TMSb) соответственно. Реагенты в реактор напускались одновременно в течение 1 мин. Скорость подачи TMIIn составляла 8 мкмоль/мин при соотношении  $[\text{TMSb}]/[\text{TMIIn}] = 40$ . Квантовые штрихи InSb осаждались при температуре  $440^\circ\text{C}$  как непосредственно на подложку InAs, так и на предварительно наращенный на данную подложку матричный эпитаксиальный слой  $n^0$ -InAs.

Рельеф поверхности образца исследовался с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47H и зондовой лаборатории „Ntegra-Aura“ производства российской компании НТ-МДТ (г. Зеленоград, Россия). Измерения проводились в полуконтактном режиме с применением стандартных кремниевых зондов NSG-11 с типичной резонансной частотой  $\sim 150$  кГц и характерной жесткостью 5 Н/м. Методика исследования поверхности, примененная в данной работе, была описана ранее [6]. На рис. 2 представлены АСМ-изображения поверхностей образцов со свободно стоящими квантовыми штрихами InSb, осажденными как непосредственно на подложку  $n^+$ -InAs(001), так и на эпитаксиальный слой  $n^0$ -InAs, выращенный на подложке  $n^+$ -InAs. Средние линейные размеры штрихов составляли 500, 150 и 50 нм в длину, ширину и высоту соответственно, при этом геометрическая форма штрихов существенно не менялась. Более того, сохранялась ориентация штрихов относительно одного из кристаллографических направлений [110]. Следует отметить, что плотность штрихов, полученных на эпитаксиальном слое InAs ( $0.7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ ) при тех же технологических условиях почти в 1.5–2 раза была ниже, чем на поверхности подложки ( $1.1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ ), и это было обусловлено исключительно влиянием шероховатости поверхности матрицы [7]. Полученные квантовые штрихи InSb зарождались слоем арсенида индия в едином эпитаксиальном процессе.

Из полученных эпитаксиальных гетероструктур методом стандартной фотолитографии и селективного влажного травления были подготовлены чипы мезодиодов размерами  $500 \times 500$  мкм с круглой мезой диаметром 300 мкм и центральным точечным контактом диаметром 50 мкм. Мезодиоды монтировались на стандартных корпусах TO-18 подложкой  $n^+$ -InAs к металлическому корпусу. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследовались с помощью оригинальной автоматизированной установки, которая была сопряжена с персональным компьютером. Электролюминесценция (ЭЛ) возбуждалась прямоугольными импульсами тока с коэффициентом заполнения 50% и частотой повторения 512 Гц. Амплитуда импульсов тока варьировалась в интервале  $\pm(20-160)$  мА. Были изучены спектры ЭЛ, возникающие как при прямой, так и при обратной полярности приложенного внешнего смещения. В случае прямой полярности отрицательный потенциал внешнего смещения прикладывался к подложке  $n^+$ -InAs, а положительный — к накрывающему слою  $n^0$ -InAs. Соответственно при обратной полярности к подложке  $n^+$ -InAs прикладывался положительный потенциал, а к слою  $n^0$ -InAs — отрицательный. В ходе экспериментов регистрировалось излучение, выходящее из структуры со стороны накрывающего слоя  $n^0$ -InAs. Спектральные характеристики исследовались с помощью автоматизированной установки на базе монохроматора DK-480 (CVI Laser Corp, USA) с дифракционной решеткой 150 штр/мм. Для регистрации излучения на выходе монохроматора

Послойный состав исследуемых гетероструктур

Образец	Подложка	Слой 1	Слой 2	Слой 3
SUB	$n^+$ -InAs(001):S	$n^0$ -InAs	—	—
SN-02	$n^+$ -InAs(001):S	—	InSb QDh	$n^0$ -InAs
SN-2.2	$n^+$ -InAs(001):S	$n^0$ -InAs	InSb QDh	$n^0$ -InAs

использовался фотовольтаический детектор InSb (Judson Co, USA), работающий при температуре жидкого азота. Сигнал с фотодиода поступал на вход селективного усилителя SR-810 (Stanford Research Systems, USA). Результирующий сигнал передавался в компьютер, который осуществлял управление процессом измерений.

В качестве реперных образцов были использованы структуры, полученные на промежуточных этапах эпитаксиального наращивания: SUB, на основе асимметричного гомоперехода  $n^+$ -InAs/ $n^0$ -InAs, и SN-02, на основе слоя квантовых штрихов (QDh) InSb, помещенного в гомопереход  $n^+$ -InAs/ $n^0$ -InAs (см. таблицу).

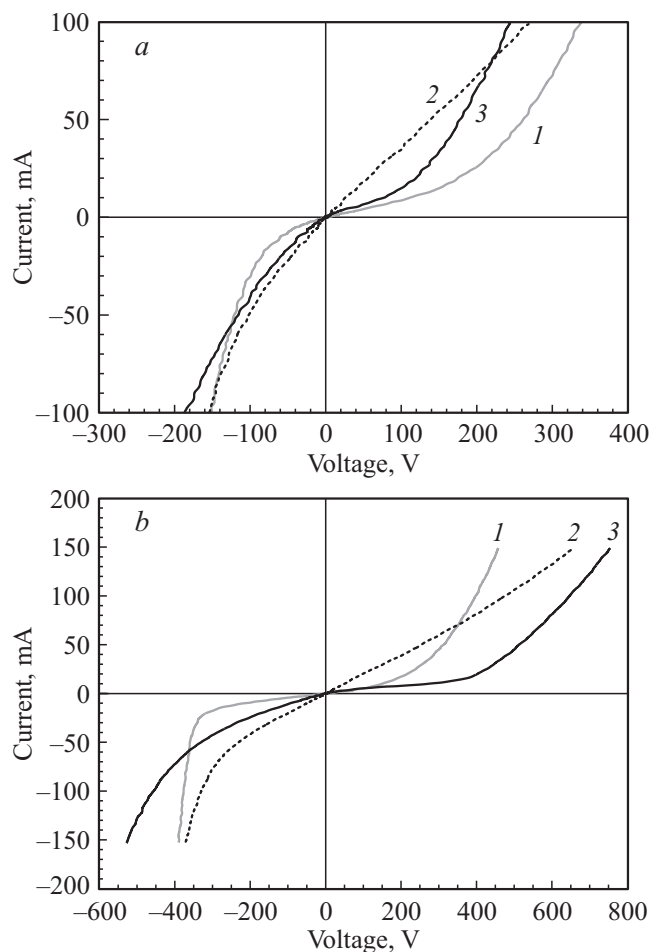
### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики, полученные для всех исследуемых образцов. Из рис. 3, *a* видно, что ВАХ  $n^+$ - $n^0$ -гомоперехода (образец SUB, кривая 1) при комнатной температуре ( $T = 300$  К) подобна характеристике обращенного диода, где ток, протекающий через образец, при приложении обратного смещения возрастает в два раза быстрее, чем при прямом смещении. В таком переходе, как правило, отсутствует область с высоким сопротивлением вследствие контакта двух изотипных полупроводников. В несимметричном  $n^+$ - $n^0$ -переходе основная часть области пространственного заряда располагается вблизи границы раздела со стороны эпитаксиального  $n^0$ -слоя с меньшей концентрацией электронов. Тогда при приложении внешнего смещения основное падение напряжения будет приходиться на слабо легированную часть образца. Когда к  $n^+$ - $n^0$ -переходу приложено прямое смещение, потенциальный барьер для электронов на  $n^+$ - $n^0$ -интерфейсе понижается, что приводит к возрастанию диффузионного тока из  $n^+$ -области. При обратном смещении  $n^+$ - $n^0$ -перехода резкий рост тока связан с возникновением обогащенной электронами приграничной области на интерфейсе со стороны эпитаксиального слоя  $n^0$ -InAs. При понижении температуры до 77 К наблюдается четко выраженный пробой при смещениях  $> 0.34$  В (рис. 3, *b*).

При введении квантовых штрихов InSb в гомопереход  $n^+$ -InAs/ $n^0$ -InAs, где нанобъекты были получены непосредственно на интерфейсе подложка/эпитаксиальный слой (образец SN-02), вольт-амперная характеристика наногетероструктуры представляет собой почти линейную зависимость тока от приложенного напряжения (рис. 3, кривая 2). При прямом смещении наличие на

гетерогранице разъединенного гетероперехода InSb/InAs можно рассматривать как туннельно-прозрачный потенциальный барьер для электронов, инжектируемых из подложки  $n^+$ -InAs в слой  $n^0$ -InAs. Пространственное разнесение гетерограниц InSb/InAs приводит к уменьшению потенциальных барьеров при протекании тока через  $n^+$ - $n^0$ -интерфейс, в результате чего ВАХ наногетероструктуры становится омической. При приложении обратного смещения отклонение от линейности связано с образованием на разъединенной гетерогранице II рода InSb/ $n^0$ -InAs потенциальной ямы, заполненной электронами, вследствие изгиба зоны проводимости InAs.

Формирование квантовых штрихов InSb внутри матрицы InAs на основе нелегированных эпитаксиальных слоев позволило получить наногетероструктуру, в которой уровни размерного квантования дырок нанобъекта находятся в окружении самосогласованных потенциальных ям для электронов, расположенных в арсениде индия по обе стороны гетерограниц InSb/ $n^0$ -InAs (см. рис. 1). Поскольку внешнее легирование эпитаксиальных слоев не проводилось, матрицу можно считать изотипной, с электронным типом проводимости. Однако неравнознач-

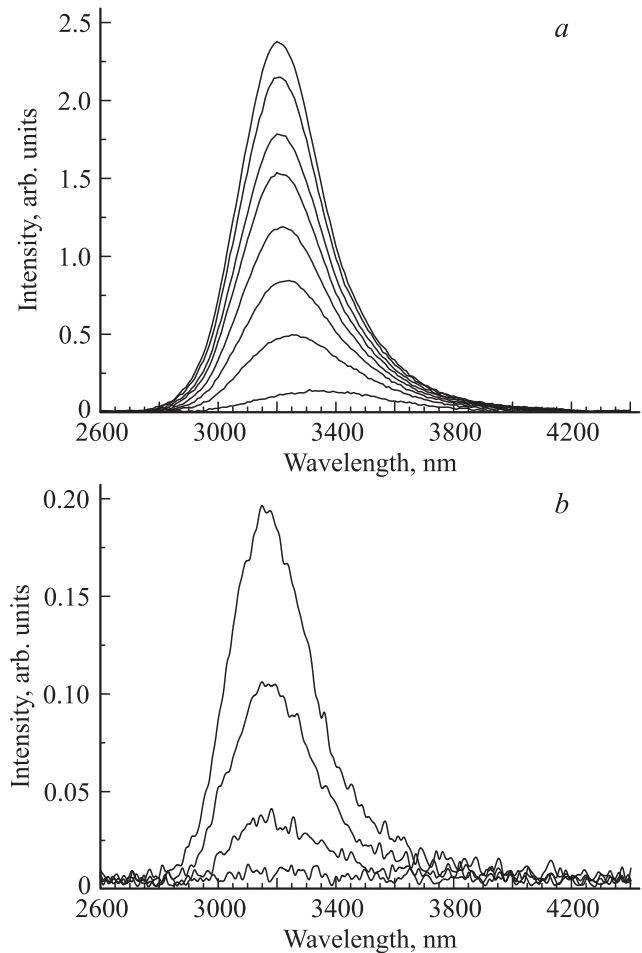


**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики гетероструктур, полученных на подложке  $n^+$ -InAs (см. таблицу), при  $T = 300$  (a) и 77 К (b). Образцы: 1 — SUB, 2 — SN-02, 3 — SN-2.2.

ность слоев, буферного и покрывающего, определяет асимметричность ВАХ гетероструктуры SN-2.2, которая особенно заметна при низких температурах (рис. 3, *b*, кривая 3). Поскольку квантовые штрихи формируются непосредственно на буферном (нижнем) слое, а верхний слой только покрывает уже сформированные нанобъекты, влияние гетерограниц  $\text{InSb}/n^0\text{-InAs}$  на транспортные свойства гетероструктуры будет различным. В случае обратного смещения экспоненциальный рост тока наблюдается в интервале напряжений в 1.5–2 раза меньшем, чем при прямом смещении, что может быть объяснено различной степенью изгиба зоны проводимости вблизи гетерограницы  $\text{InSb}/n^0\text{-InAs}$  в зависимости от направления приложенного внешнего электрического поля. При этом в прямой ветви ВАХ при температуре  $T = 77\text{ К}$  обнаружена особенность, обусловленная возникновением обедненной области вблизи гетерограницы  $\text{InSb}/\text{InAs}$  на стороне покрывающего слоя  $\text{InAs}$  (см. рис. 3, *b*).

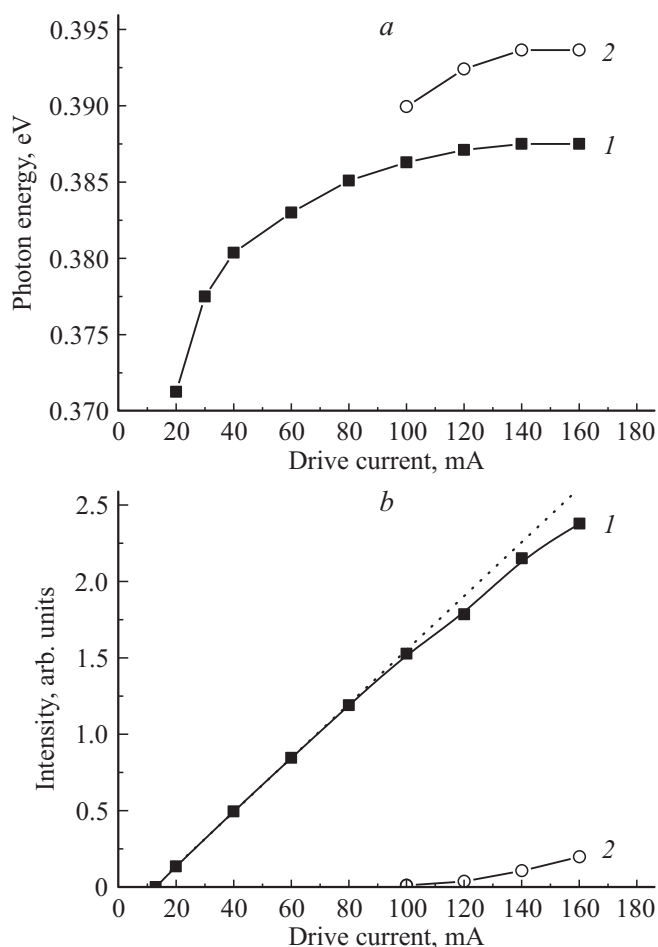
На рис. 4 представлены спектры электролюминесценции для гетероструктуры SN-2.2, полученные при  $T = 77\text{ К}$  при приложении к образцу прямого или обратного смещения. Спектры ЭЛ при прямом смещении содержали одиночную полосу излучения асимметричной формы с резким высокоэнергетическим краем и затянутым спадом в области низких энергий фотона (рис. 4, *a*). Люминесценция появлялась при токе накачки 20 мА с максимумом в районе длины волны  $\lambda = 3.34\text{ мкм}$  (0.371 эВ). При увеличении приложенного напряжения максимум полосы сдвигался в сторону высоких энергий фотона вплоть до  $\lambda = 3.20\text{ мкм}$  (0.388 эВ) при токе накачки  $> 100\text{ мА}$ , т.е. наблюдался так называемый „голубой“ сдвиг. При обратном смещении (см. рис. 4, *b*) „голубой“ сдвиг максимума полосы ЭЛ был значительно меньше: от 3.18 мкм (0.390 эВ) до 3.15 мкм (0.394 эВ) при увеличении тока накачки от 120 до 160 мА. Такое поведение полосы ЭЛ с ростом тока может быть связано с заполнением потенциальной ямы для электронов на стороне матричного слоя  $\text{InAs}$ . При высоком уровне инжекции и, следовательно, при большем смещении, приложенном к образцу, создаются условия для формирования квантовых уровней локализации электронов, что приводило к стабилизации спектрального положения полосы ЭЛ (0.388 и 0.394 эВ при прямом и обратном смещении соответственно).

Отметим, что при обоих смещениях электролюминесценция была положительная, однако интенсивность излучения различалась на порядок в зависимости от знака приложенного внешнего напряжения. Наблюдаемые особенности электролюминесцентных свойств образца SN-2.2, как то „голубой“ сдвиг полосы излучения при увеличении тока накачки, протекающего через гетероструктуру, асимметричность пика ЭЛ с резким высокоэнергетическим краем, а также энергия фотона регистрируемого излучения, меньшая ширины запрещенной зоны матрицы ( $E_g(\text{InAs}) = 0.408\text{ эВ}$  при  $T = 77\text{ К}$  [8]), указывают на тот факт, что мы имеем



**Рис. 4.** Спектры электролюминесценции при  $T = 77\text{ К}$  для наногетероструктуры II рода с квантовыми штрихами  $\text{InSb}$ , сформированными в матрице  $n^0\text{-InAs}$ , с контактным слоем  $n^+\text{-InAs}$  (SN-2.2): *a* — при прямом смещении в интервале токов накачки 20–160 мА с шагом 20 мА, *b* — при обратном смещении в интервале токов накачки 100–160 мА с шагом 20 мА.

дело с излучательной рекомбинацией на гетерогранице II рода [9]. Помещение слоя квантовых штрихов  $\text{InSb}$  на границе раздела двух матричных слоев  $\text{InAs}$  приводит к проявлению интерфейсных явлений, которые в свою очередь отражаются на электролюминесцентных свойствах гетероструктуры. В данном случае нужно говорить об интерфейсных излучательных переходах электронов из самосогласованной потенциальной ямы на гетерогранице II рода  $\text{InSb}/\text{InAs}$  на локализованные дырочные состояния в квантовых штрихах  $\text{InSb}$ . Наблюдаемое спектральное положение пика ЭЛ в случае разьединенной гетероструктуры II рода на основе квантовых штрихов  $\text{InSb}$  в матрице  $n\text{-InAs}$  указывает на то, что уровни локализованных дырочных состояний квантовых штрихов  $\text{InSb}$  располагаются в запрещенной зоне матрицы вблизи дна зоны проводимости  $\text{InAs}$  (см. рис. 1, штриховая линия).

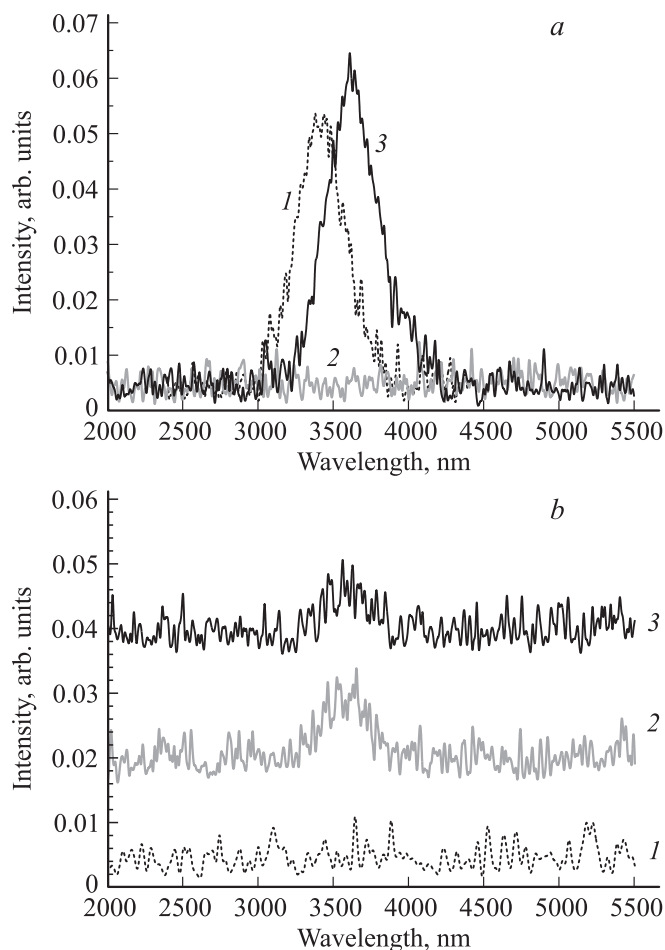


**Рис. 5.** Зависимости спектрального положения пика электролюминесценции (а) и интенсивности в максимуме полосы излучения (б) при  $T = 77$  К от тока накачки для наногетероструктуры II рода с квантовыми штрихами InSb, сформированными в матрице  $n^0$ -InAs, с контактным слоем  $n^+$ -InAs (SN-2.2): 1 — прямое смещение, 2 — обратное смещение.

Вследствие неравнозначности слоев матрицы  $n^0$ -InAs существует ряд различий в электролюминесценции при прямом и обратном смещении. Во-первых, изгиб в зоне проводимости в арсениде индия локализирует электроны в самосогласованной потенциальной яме, которая может быть различным образом в зависимости от матричного слоя. В буферном (нижнем) он меньше, в покрывающем (верхнем) больше в силу специфики формирования интерфейсных деформаций между матричными слоями InAs и квантовыми штрихами InSb. Тогда интерфейсная люминесценция при прямом смещении возникает при энергиях фотона, меньших, чем при обратном смещении (рис. 5, а). Во-вторых, сильно легированная подложка  $n^+$ -InAs, которая может выступать в качестве дополнительного инжектора электронов, обеспечивает значительный приток носителей заряда в область рекомбинации, и интенсивность ЭЛ при прямом смещении, естественно, становится выше, чем при обратном (рис. 5, б). Однако

при больших уровнях накачки наблюдается сублинейный участок на токовой зависимости интенсивности ЭЛ при прямом смещении, что может быть объяснено существованием дополнительного интерфейса на пути протекания тока в виде гомоперехода  $n^+ - n^0$ , тогда как для интерфейсной люминесценции при обратном смещении характерна суперлинейная зависимость.

Особо впечатляющим фактом, наблюдаемым впервые для гетероструктур с квантовыми штрихами InSb, помещенными в изотипную матрицу  $n$ -InAs, было обнаружение электролюминесценции при комнатной температуре. В одиночном  $n^+ - n^0$ -гомопереходе (образец SUB) излучение наблюдалось вблизи  $\lambda = 3.46$  мкм (0.358 эВ) при прямом смещении (рис. 6, а, спектр 1), что соответствует межзонной излучательной рекомбинации в объеме нелегированного эпитаксиального слоя InAs с энергией перехода, близкой к ширине запрещенной зоны арсенида индия ( $E_g(\text{InAs}) = 0.356$  эВ при  $T = 300$  К [8]). Присутствие квантовых штрихов InSb непосредственно на гетерогранице  $n^+$ -InAs/ $n^0$ -InAs (образец SN-02, спектр 2) приводит к подавлению люминесценции, тогда



**Рис. 6.** Спектры электролюминесценции при комнатной температуре для исследованных наногетероструктур при прямом (а) и обратном (б) смещении, токе 100 мА. Образцы: 1 — SUB, 2 — SN-02, 3 — SN-2.2.

как в наногетероструктурах с квантовыми штрихами InSb в эпитаксиальной матрице  $n^0$ -InAs (образец SN-2.2, спектр 3) наблюдалась ЭЛ с максимумом в области длины волны  $\lambda = 3.62$  мкм, что соответствует энергии излучательных переходов  $\sim 0.342$  эВ. Полученное значение на 14 мэВ меньше ширины запрещенной зоны матрицы; следовательно, при отсутствии внешнего легирования можно предположить, что наблюдаемая люминесценция при комнатной температуре, когда все мелкие примесные состояния с энергиями  $< kT = 26$  мэВ термически опустошены, обусловлена интерфейсными излучательными рекомбинационными переходами через разьединенную гетерограницу II рода InSb/InAs на локализованные состояния квантовых штрихов InSb.

Интерфейсная природа излучательной рекомбинации в гетероструктурах с квантовыми штрихами InSb в матрице InAs подтверждается измерениями ЭЛ при обратном смещении, когда на подложку  $n^+$ -InAs подается положительный потенциал (рис. 6, b). Из рисунка видно, что люминесценция в  $n^+ - n^0$ -гомопереходе (образец SUB, спектр 1) отсутствует по причине недостаточной ширины области пространственного заряда. Появление положительной люминесценции в образце SN-02 (спектр 2) с максимумом излучения вблизи  $\lambda = 3.58$  мкм (0.346 эВ) обусловлено асимметрией гетероструктуры  $n^+$ -InAs/InSb/ $n^0$ -InAs, когда при данной полярности прикладываемого внешнего смещения потенциальная яма в зоне проводимости со стороны нелегированного арсенида индия заполняется электронами, которые излучательно переходят на дырочные состояния квантовых штрихов InSb. В гетероструктуре с квантовыми штрихами InSb, расположенными в нелегированной матрице  $n$ -InAs (образец SN-2.2, спектр 3), также наблюдается положительная люминесценция в области длины волны  $\lambda = 3.58$  мкм, которая совпадает с длиной волны излучения для гетероструктуры SN-02, при этом энергетическое положение максимума отличается на 4–6 мэВ от положения пика ЭЛ при прямом смещении, так же как и при температуре  $T = 77$  К (см. рис. 5, a). Следовательно, природа излучательных переходов для данной наногетероструктуры инвариантна относительно направления потока инжектируемых носителей и обусловлена наличием локализованных состояний квантовых штрихов InSb в матрице InAs.

#### 4. Заключение

Таким образом, на примере наногетероструктуры, содержащей одиночный слой квантовых штрихов InSb, помещенный в узкозонную матрицу InAs, была показана определяющая роль объектов пониженной размерности в формировании электрических и электролюминесцентных свойств гетероструктуры. Впервые наблюдалась электролюминесценция при комнатной температуре в гетероструктуре II рода InSb/InAs на основе квантовых штрихов. Показано, что основной вклад в люминесцент-

ные свойства гетероструктуры определяется излучательными рекомбинационными переходами электронов из матрицы InAs через разьединенную гетерограницу II рода на дырочные состояния в квантовых штрихах InSb.

Авторы выражают благодарность П.А. Дементьеву за проведение измерений методом атомно-силовой микроскопии.

Работа частично поддержана проектом РФФИ (№ 11-02-00234а) и выполнена в рамках программы Отделения физических наук РАН „Новые материалы“.

#### Список литературы

- [1] А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, П. Кубат, К.Д. Моисеев, С. Цивиш, Ю.П. Яковлев. ФТП, **35** (3), 375 (2001).
- [2] В.В. Романов, Э.В. Иванов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, К.Д. Моисеев, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **27** (14), 80 (2001).
- [3] Я.А. Пархоменко, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев. ФТП, **47** (11), 1536 (2013).
- [4] A. Karim, O. Gustafsson, L. Hussain, Q. Wang, B. Noharet, M. Hammar, J. Anderson. J. Song. SPIE Proc., **8439**, 84391J (2012).
- [5] В.В. Романов, М.В. Байдакова, К.Д. Моисеев. ФТП, **48** (5), 753 (2014).
- [6] К.Д. Моисеев, Я.А. Пархоменко, Е.В. Гущина, А.В. Анкудинов, М.П. Михайлова, Н.А. Берт, Ю.П. Яковлев. ФТП, **43** (8), 1142 (2009).
- [7] В.В. Романов, П.А. Дементьев, К.Д. Моисеев. ФТП, **47** (3), 420 (2013).
- [8] Landolt-Börnstein. Handbook, Numerical Data, Ser. III (Springer, Berlin, Heidelberg) v. 17a, ed. by O. Madelung (1982) p. 264; v. 22a, ed. by K.-H. Hellwege (1987) p. 305.
- [9] M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, Yu.P. Yakovlev. Semicond. Sci. Technol., **19**, R109 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

#### High-temperature interfacial electroluminescence in type II broken-gap heterostructures based on InSb quantum dashes in $n$ -InAs matrix

V.V. Romanov, E.V. Ivanov, K.D. Moiseev

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

**Abstract** Room-temperature electroluminescence has been for the first time observed in type II heterostructures based on InSb quantum dashes inserted in a narrow-gap  $n$ -InAs matrix. The nanoheterostructures under study exhibited positive luminescence in the wavelength range 3–4  $\mu\text{m}$ , which was due to interfacial recombination transitions of electrons across the type II broken-gap InSb/InAs heterointerface from adjacent quantum wells at the InAs matrix layer side to the holes quantisation levels in the InSb quantum dashes situated into the forbidden gap of the matrix and close to the conduction band bottom of the InAs.