

# Электролюминесценция светодиодных гетероструктур InAs/InAs(Sb)/InAsSbP в диапазоне температур 4.2–300 К

© К.Д. Мынбаев<sup>1,2</sup>, Н.Л. Баженов<sup>1</sup>, А.А. Семакова<sup>1,2</sup>, М.П. Михайлова<sup>1</sup>, Н.Д. Стоянов<sup>3</sup>, С.С. Кижаяев<sup>3</sup>, С.С. Молчанов<sup>3</sup>, А.П. Астахова<sup>3</sup>, А.В. Черняев<sup>1,3</sup>, Н. Lipsanen<sup>2,4</sup>, В.Е. Бугров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Микросенсор Технолоджи, 194223 Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Aalto University, 02150 Aalto, Finland

E-mail: mynkad@mail.ioffe.ru

(Получена 27 апреля 2016 г. Принята к печати 8 июня 2016 г.)

Исследована электролюминесценция светодиодных гетероструктур InAs/InAsSbP и InAsSb/InAsSbP, выращенных на подложках InAs, в диапазоне температур  $T = 4.2\text{--}300$  К. При низких температурах ( $T = 4.2\text{--}100$  К) обнаружен эффект возникновения стимулированного излучения на длинах волн 3.03 и 3.55 мкм для структур InAs/InAsSbP и InAsSb/InAsSbP соответственно, с резонатором, сформированным перпендикулярно плоскости роста. Излучение становилось спонтанным при  $T > 70$  К из-за резонансного „включения“ оже-процесса СННС, при котором энергия рекомбинирующей электронно-дырочной пары передается дырке с переходом последней в спин-орбитально отщепленную зону, и оставалось таковым с увеличением температуры из-за усиления влияния других оже-процессов. Полученные результаты показывают перспективность использования структур на основе InAs/InAs(Sb)/InAsSbP для создания вертикально-излучающих лазеров среднего инфракрасного диапазона.

DOI: 10.21883/FTP.2017.02.44113.8305

## 1. Введение

Известно, что в средней инфракрасной (ИК) области спектра (диапазон длин волн 2–6 мкм) лежат характеристические полосы поглощения многих химических соединений ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$  и др.). Датчики этих веществ востребованы как для контроля состояния атмосферы, так и в промышленном производстве. Наиболее перспективными являются оптические ИК датчики на основе светодиодов. По сравнению с тепловыми источниками излучения светодиоды обладают более высоким быстродействием, меньшими размерами, меньшей потребляемой электрической мощностью, более длительным сроком службы, и при массовом производстве меньшей себестоимостью. Светодиоды среднего ИК диапазона обычно изготавливаются на основе узкозонных полупроводниковых соединений и твердых растворов  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  [1].

Для повышения эффективности работы оптоэлектронных приборов необходимо досконально понимать и контролировать процессы, происходящие в них при генерации или поглощении света. Для этого полезно исследовать работу приборных структур не только при рабочей температуре, которая обычно равна комнатной, но и при более низких температурах. В этом случае оказывается возможным наблюдать эффекты, позволяющие более точно установить механизмы про-

исходящих в структурах процессов. Так, например, во флип-чип светодиодах на основе двойных гетероструктур InAsGaP/InAs/InAsGaP, выращенных на подложках из InAs и излучавших при рабочей температуре  $T = 300$  К на длине волны  $\lambda = 3.4$  мкм, при охлаждении до  $T = 77$  К ранее наблюдался эффект возникновения стимулированного излучения с пиком при  $\lambda = 3.0$  мкм [2]. Такой же эффект при  $T = 77$  К недавно наблюдался нами для более узкозонных структур с активной областью из InAsSb, также выращенных на подложке из InAs. При этом в наших структурах активная область была ограничена барьерным слоем InAsSbP только с одной стороны (т.е. структура имела вид InAs/InAsSb/InAsSbP) [3]. В аналогичных структурах с активной областью из InAs, где можно было бы ожидать более высокую квантовую эффективность, эффект стимулированного излучения при  $T = 77$  К отсутствовал. Исследование данного явления представляется актуальным как с точки зрения повышения эффективности светодиодных структур, так и для создания полупроводниковых лазеров среднего ИК диапазона. В связи с этим мы изучили электролюминесценцию (ЭЛ) подобных структур в широком диапазоне температур, от температуры жидкого гелия ( $T = 4.2$  К) до комнатной, и о результатах этого исследования сообщаем в настоящей работе.

## 2. Методика экспериментов

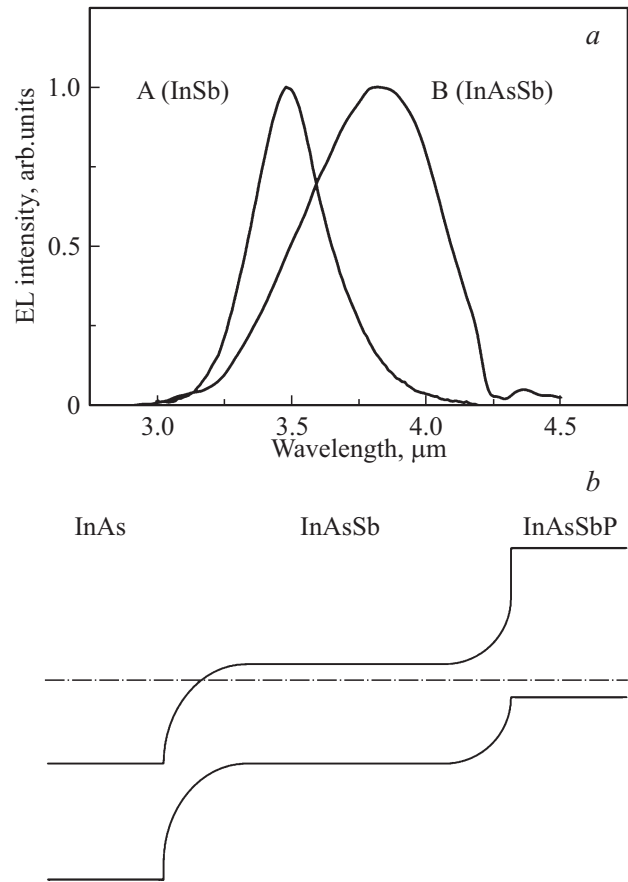
Гетероструктуры были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений в российской компании Микросенсор Технолджи по методике, аналогичной изложенной в работе [4]. Для создания гетероструктур на подложке InAs (легированной S) *n*-типа проводимости (концентрация электронов  $n \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) выращивался активный слой из InAs (структуры типа А) или  $\text{InAs}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}$  (структуры типа В) толщиной 6–8 мкм. Этот слой имел *n*-тип проводимости с концентрацией электронов  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Выращивание гетероструктур завершалось созданием широкозонного барьерного слоя:  $\text{InAs}_{0.15}\text{Sb}_{0.31}\text{P}_{0.54}$  для структур типа А и  $\text{InAs}_{0.70}\text{Sb}_{0.10}\text{P}_{0.20}$  для структур типа В. Барьерный слой был легирован акцепторной примесью (Zn) до концентрации дырок  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Светоизлучающие чипы размером  $0.38 \times 0.38 \text{ мм}$  создавались методом стандартной фотолитографии и жидкостного химического травления. Применялась контактная система на основе многослойной композиции Cr–Au–Ni–Au. На эпитаксиальной стороне структуры формировался сплошной контакт, а на подложке InAs размещался кольцевой контакт шириной 35 мкм и с внутренним диаметром 200 мкм. Таким образом, излучение выводилось из гетероструктуры через сильно легированную (и поэтому прозрачную для него) подложку InAs. Образцы монтировались на корпуса ТО-18.

Исследовались спектры электролюминесценции (ЭЛ) структур при импульсном возбуждении с током накачки до 4 А, частотой следования импульсов 1 кГц и длительностью импульса 1 мкс. Сигнал регистрировался синхронным детектором BCI280 с помощью охлаждаемого фотодиода на основе InSb. Во время измерений образцы находились в гелиевом криостате. Для контроля температуры в криостате использовались германиевый терморезистор и термопара медь–константан. Запись спектров проводилась с помощью монохроматора МДР-23.

## 3. Экспериментальные результаты

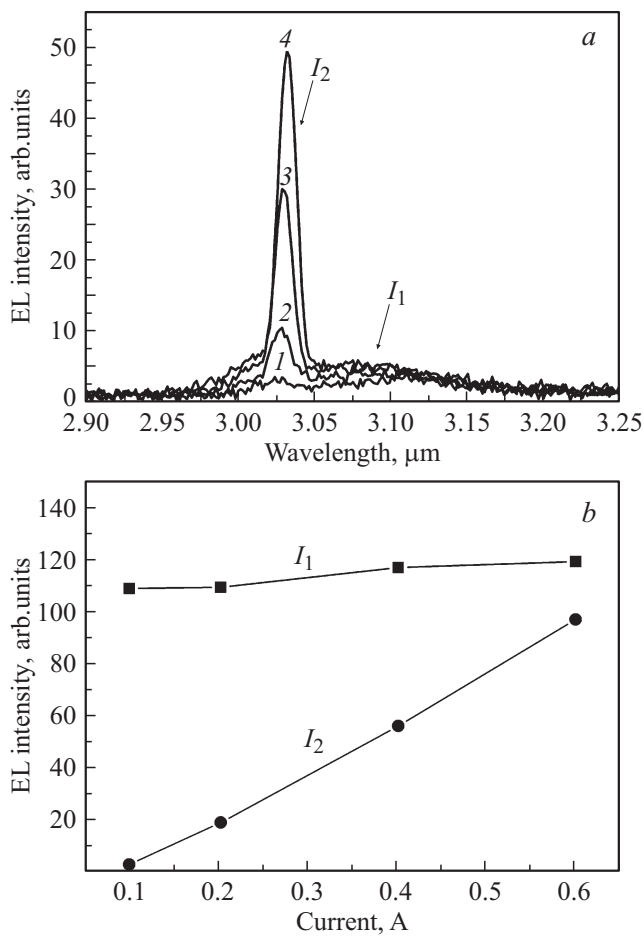
На рис. 1, *a* представлены нормированные спектры ЭЛ структур обоих типов при рабочей температуре светодиодов  $T = 300 \text{ К}$ . Спектры были записаны при токе накачки 1 А и имели вид, характерный для светодиодов с активной областью из InAs(Sb). Типичные полуширины линий излучения при  $T = 300 \text{ К}$  составили 280 нм для структур типа А и 430 нм для структур типа В. На рис. 1, *b* представлена зонная диаграмма структуры типа В при  $T = 300 \text{ К}$ , построенная согласно принципам, изложенным в монографии [5], и параметрам (ширина запрещенной зоны материалов  $E_g$ , энергия электронного сродства и т. п.), взятым из работы [6]. Как видно из диаграммы, материал подложки является сильно вырожденным, активная область *n*-типа проводимости



**Рис. 1.** Спектры электролюминесценции (ЭЛ) гетероструктур типов А, В при  $T = 300 \text{ К}$  (*a*) и зонная диаграмма гетероструктуры типа В при  $T = 300 \text{ К}$  (*b*). Штрихпунктирная линия — уровень Ферми в равновесии (при отсутствии смещения).

обладает относительно низкой концентрацией электронов, а барьерный слой *p*-типа — высокой концентрацией дырок. Можно ожидать, что оптические переходы при  $T = 300 \text{ К}$  в такой структуре будут происходить с энергией, соответствующей ширине запрещенной зоны  $\text{InAs}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}$ , 0.303 эВ, что соответствует  $\lambda = 4.09 \text{ мкм}$ . В эксперименте (рис. 1, *a*) максимум ЭЛ структуры типа В соответствует  $\lambda = 3.83 \text{ мкм}$  из-за подъема квазиуровня Ферми для электронов вследствие заполнения зоны проводимости в результате инжекции. В структурах типа А из-за большей ширины запрещенной зоны и большей эффективной массы электронов этот эффект был выражен гораздо слабее, и энергия излучаемого кванта (355 мэВ) была близка к расчетному значению  $E_g$  активной области (354 мэВ).

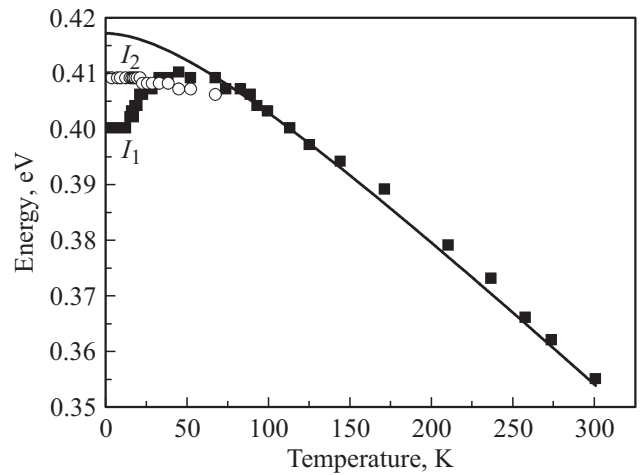
На рис. 2, *a* представлены спектры ЭЛ структуры типа А при  $T = 4.2 \text{ К}$  и различных токах накачки. Здесь видно, как на коротковолновом крае широкой полосы излучения  $I_1$  (полуширина  $\sim 200 \text{ нм}$ , в единицах энергии  $\sim 20 \text{ мэВ}$ ) при увеличении тока появляется вторая, узкая линия  $I_2$  с полушириной 12 нм ( $\sim 2 \text{ мэВ}$ ), которую можно было рассматривать как линию сти-



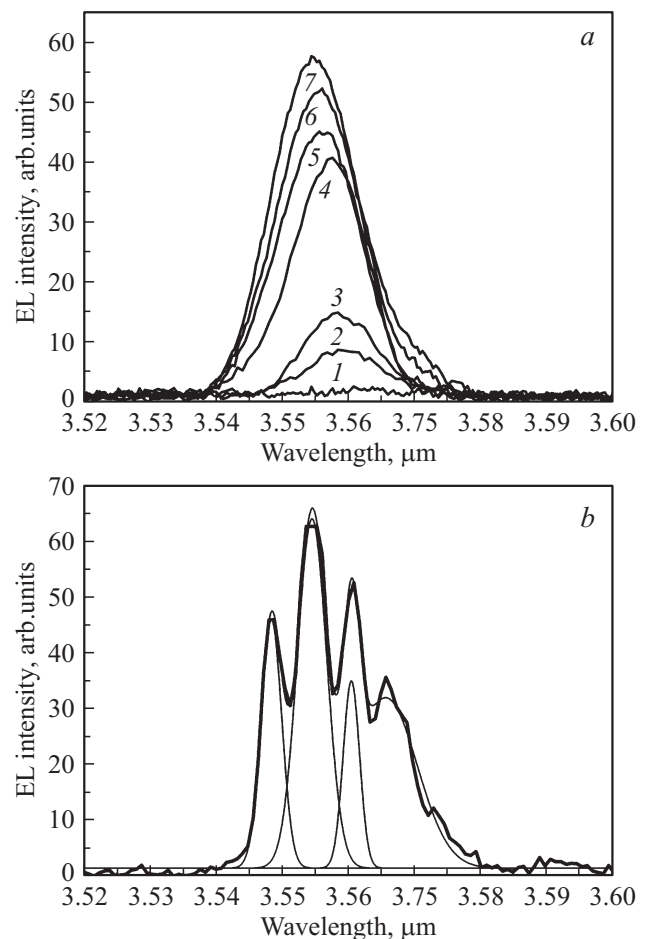
**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции (EL) гетероструктуры типа А при  $T = 4.2$  К, токах накачки 0.1 (1), 0.2 (2), 0.4 (3) и 0.6 А (4) (а) и зависимости интенсивности линий  $I_1$  и  $I_2$  от тока (б).

мулированного излучения. Исследование зависимостей интенсивностей линий от тока при  $T = 4.2$  К показало, что с его увеличением от 0.1 до 0.6 А интенсивность полосы  $I_1$  увеличивалась очень слабо, а линии  $I_2$  — значительно (см. рис. 2, б). При увеличении температуры от 4.2 до 70 К при постоянном токе накачки 0.6 А интенсивность линии  $I_2$  уменьшилась приблизительно в 3 раза, а линий  $I_1$  возросла в 1.5 раза. При температуре  $\sim 70$  К в спектре оставалась одна полоса  $I_1$  с максимумом при  $\lambda = 3.05$  мкм, причем ее интенсивность была больше, чем интегральная интенсивность ЭЛ при температуре 55 К. В диапазоне температур 70–85 К интенсивность ЭЛ слегка возрастала, а после 85 и до 300 К уменьшалась, при этом спектр сохранял свою форму.

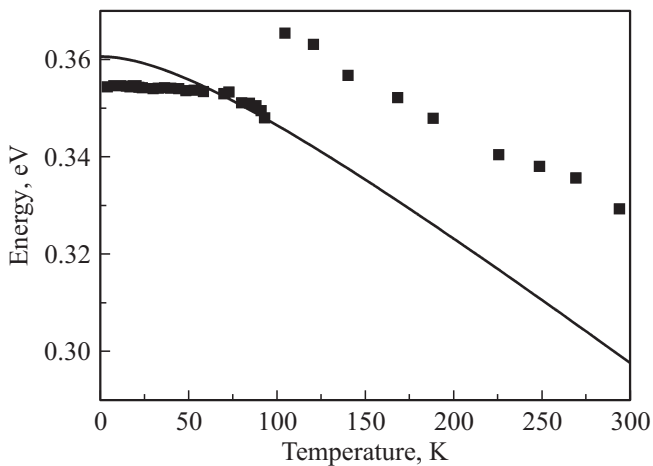
На рис. 3 представлены зависимости энергетического положения пиков ЭЛ структуры типа А от температуры. Записи спектров осуществлялись при одном и том же токе накачки  $I = 0.6$  А. Видно, что при  $T > 70$  К энергия излучения соответствует величине  $E_g$  активной области, рассчитанной согласно данным [6]. При более низких



**Рис. 3.** Зависимости энергетического положения пиков ЭЛ от температуры для структуры типа А при токе 0.6 А (точки) и расчетная зависимость  $E_g(T)$  активной области из InAs (сплошная линия).



**Рис. 4.** Спектры электролюминесценции (EL) гетероструктуры типа В при  $T = 4.2$  К, токах накачки 0.02 (1), 0.08 (2), 0.10 (3), 0.28 (4), 0.30 (5), 0.35 (6), 0.40 А (7) (а) и спектр при  $T = 77$  К, токе 0.2 А, в котором видна модовая структура (б). б: тонкими линиями показаны подгонка спектра и разложение на отдельные линии для трех левых мод, расстояние между модами 6 нм, полуширина линий  $\sim 2$  нм.



**Рис. 5.** Зависимость положения пика ЭЛ от температуры для структуры типа В (точки) и расчетная зависимость  $E_g$  активной области  $\text{InAs}_{0.93}\text{Sb}_{0.07}$  от температуры (сплошная линия).

температурах, когда в спектре присутствуют два пика, их энергии лежат ниже значения  $E_g$ .

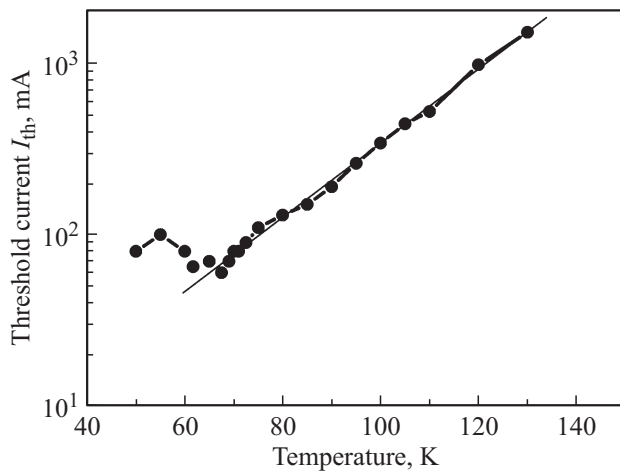
Для структур типа В ( $\text{InAs}/\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ ) при температурах, близких к гелиевой, наблюдались только узкие пики стимулированного излучения с полуширинами в единицы нанометров (рис. 4, а). С увеличением тока интегральная интенсивность сигнала ЭЛ возрастала линейно, а максимум пика сдвигался в сторону более коротких волн („голубое смещение“), отражая, очевидно, подъем квазиуровня Ферми для электронов. В спектре стимулированного излучения наблюдалась четко выраженная модовая структура, она представлена на рис. 4, б для спектра, записанного при  $T = 77$  К. На рис. 5 представлены энергетические положения пиков ЭЛ в зависимости от температуры для одной из исследованных структур типа В. Запись спектров осуществлялась при одном и том же токе накачки  $I = 0.2$  А. При  $T > 100$  К энергия излучения кванта для этой структуры была на  $\sim 20$  мэВ больше расчетного значения  $E_g$  в активной области. Как упоминалось выше, это можно объяснить сдвигом квазиуровня Ферми для электронов в зону проводимости и эффектом Мосса–Бурштейна [3]. При  $T < 100$  К энергии пиков излучения были близки к  $E_g$  или лежали несколько ниже этого значения.

#### 4. Обсуждение результатов

Анализ полученных результатов показывает, что при низких температурах (4.2–100 К) в исследованных гетероструктурах создавались условия для возникновения стимулированного излучения. Если говорить о структурах с активной областью из  $\text{InAs}$ , то, как уже отмечено выше, об аналогичном эффекте впервые сообщалось в [2]. Стимулированное излучение из более узкозонных по сравнению с  $\text{InAs}$  твердых растворов  $\text{InAsSb}$  до сих

пор наблюдалось только в специально изготовленных лазерных структурах, в частности в структурах с полосковым резонатором и электронным ограничением за счет создания двойной гетероструктуры с симметричными высокими барьерами (см., например, [7–9]). В нашем случае, однако, резонаторы специально не формировались, а сколы чипов не были зеркальными. По данным рис. 4, б было определено расстояние между отдельными модами в спектре ЭЛ. Оно составило 6 нм, что по методике, описанной в работе [9], позволило оценить длину резонатора как 280 мкм. Это значение гораздо ближе к толщине чипа ( $\sim 300$  мкм), чем к расстоянию между его сколами (380 мкм). Кроме того, было установлено, что для структур типа В при  $T = 77$  К, когда наблюдалось стимулированное излучение, сигнал ЭЛ, собираемый с поверхности чипа (подложки  $\text{InAs}$ ), на несколько порядков превышал сигнал, который регистрировался при измерении со сколов. Отсюда можно было сделать однозначный вывод о том, что оптический резонатор формировался перпендикулярно слоям гетероструктуры — вероятнее всего, между хорошо отшлифованной нижней гранью кристалла со сплошным золотым контактом и верхней гранью, отполированной химически и образующей границу раздела полупроводник/воздух, аналогично случаю, описанному в [2]. В этом случае для структур типа А плотность порогового тока при  $T = 4.2$  К можно было оценить как  $j_{\text{th}} \sim 140$  А/см<sup>2</sup>.

Обращает на себя внимание факт совпадения энергии излучаемого кванта, при которой наступает эффект перехода стимулированного излучения в спонтанное по мере увеличения температуры, с величиной спин-орбитального отщепления  $\Delta_{SO}$  в исследуемых гетероструктурах. Так, для структуры типа А энергия излучаемого кванта  $h\nu$ , соответствующая переходу к спонтанному излучению, составила  $\sim 0.41$  эВ при величине  $\Delta_{SO} = 0.39$  эВ (по данным работы [6], где для данной величины, вообще говоря, приводится интервал 0.37–0.41 эВ). Равенство  $h\nu \approx \Delta_{SO}$  соответствовало температуре  $\sim 75$  К, что объясняет, почему мы не наблюдали стимулированное излучение из структур типа А при  $T = 77$  К [3]. В свою очередь, для структур типа В переход к спонтанному излучению происходил при  $h\nu \approx 0.36$  эВ при интервале расчетных значений  $\Delta_{SO}$  от 0.33 до 0.37 эВ. Таким образом, по мере увеличения температуры и уменьшения  $E_g$  активной области происходило резонансное „включение“ оже-процесса СННС, при котором энергия рекомбинирующей электронно-дырочной пары передается дырке с переходом последней в спин-орбитально отщепленную зону. Этот эффект хорошо известен для узкозонных полупроводников  $A^{III}B^V$  (см., например, [10–12]). По мере дальнейшего уменьшения величины  $E_g$  с ростом температуры резонанс  $E_g = \Delta_{SO}$  исчезал, и мы наблюдали некоторое увеличение интенсивности ЭЛ, которая, однако, представляла собой уже спонтанное излучение из-за влияния других оже-процессов, подавлявших усиление. Далее с увеличением скорости этих процессов с ростом температуры сигнал ЭЛ снова постепенно



**Рис. 6.** Зависимость порогового тока возникновения стимулированного излучения  $I_{th}$  от температуры для структуры типа В. Прямая линия — подгонка экспоненциального участка зависимости, использованная для определения характеристической температуры.

спал. При этом влияние оже-процессов проявлялось и при низких температурах. Так, для структур типа В при температурах, когда еще наблюдалось стимулированное излучение, мы провели измерения ватт-амперных характеристик. При наличии выраженного „излома“ на кривой по отрезку такой характеристики на оси абсцисс определяется величина  $j_{th}$  [13]. На рис. 6 приведен пример полученной зависимости. Для исследованного образца выраженную зависимость  $j_{th}(T)$  удалось получить в диапазоне температур 50–130 К. Как видно, на участке от 70 до 130 К она носила экспоненциальный характер (линейный в выбранных для рисунка координатах). Согласно известным представлениям о зависимости порогового тока полупроводникового лазера от температуры, это свидетельствует о доминировании безызлучательной (оже-) рекомбинации [14] (еще раз подчеркнем, что в данном случае речь идет не о процессе СННС, а о других формах оже-процессов, в частности с участием двух электронов и тяжелой дырки и возбуждением электрона в более высокоэнергетическое состояние, СНСС, и с участием двух тяжелых дырок и электрона с переходом тяжелой дырки в легкую, СННЛ). Определенная на участке 50–130 К характеристическая температура порогового тока составила 30 К. На участке 50–70 К выраженной зависимости  $j_{th}(T)$  не наблюдалось, что могло свидетельствовать о доминировании рекомбинации Шокли–Рида.

## 5. Заключение

Таким образом, при исследовании электролюминесценции светодиодных гетероструктур  $\text{InAs/InAs(Sb)/InAsSbP}$  при низких температурах ( $T = 4.2\text{--}100\text{ К}$ ) нами был обнаружен эффект возникновения стимули-

рованного излучения. Этот эффект, однако, исчезал по мере увеличения температуры из-за резонансного „включения“ оже-процесса СННС, и при  $T > 70\text{ К}$  для структур  $\text{InAs/InAs/InAsSbP}$ , при  $T > 100\text{ К}$  для структур  $\text{InAs/InAsSb/InAsSbP}$  из-за влияния других оже-процессов (СННС, СННЛ) излучение было спонтанным. Влияние последних оже-процессов на рекомбинацию было установлено и для низких температур. Полученные результаты, во-первых, показывают перспективность изученных гетероструктур для создания вертикально-излучающих лазеров среднего ИК диапазона, востребованных в газовых сенсорах, работающих в этой спектральной области [15], и, во-вторых, подтверждают актуальность проблемы подавления оже-рекомбинации в излучательных гетероструктурах на основе узкозонных полупроводников  $A^{III}B^V$ . Важный вывод заключается в том, что даже при ограничении скорости рекомбинации безызлучательными процессами в простых по конструкции гетероструктурах на основе  $\text{InAs/InAs(Sb)/InAsSbP}$  оказывается возможным наблюдать стимулированное излучение при минимальных требованиях к резонатору.

Работа в Университете ИТМО выполнена при государственной финансовой поддержке, выделяемой на реализацию Программы повышения конкурентоспособности Университета ИТМО среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг.

## Список литературы

- [1] *Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics*, ed. by A. Krier. [Springer Ser. in Optical Sciences (Berlin, Springer) v. 118].
- [2] В. Matveev, N. Zotova, N. Il'inskaya, S. Karandashev, M. Remennyi, N. Stus'. *Phys. Status Solidi C*, **2**, 927 (2005).
- [3] Н.К. Жумашев, К.Д. Мынбаев, Н.Л. Баженов, Н.Д. Стоянов, С.С. Кижасев, Т.И. Гурина, А.П. Астахова, А.В. Черняев, С.С. Молчанов, Х. Липсанен, Х.М. Салихов, В.Е. Бугров. *Вестн. ИТМО*, **16** (1), 57 (2016).
- [4] M. Sopanen, T. Koljonen, H. Lipsanen, T. Tuomi. *J. Cryst. Growth*, **145**, 492 (1994).
- [5] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл–полупроводник*, пер. с англ. под ред. В.С. Вавилова (М., Мир, 1975).
- [6] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815 (2001).
- [7] B. Lane, M. Razeghi. *J. Cryst. Growth*, **221**, 679 (2000).
- [8] А.П. Астахова, Т.В. Безъязычная, Л.И. Буров, А.С. Горбачев, А.Г. Рябцев, Г.И. Рябцев, М.И. Щемелев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **42**, 228 (2008).
- [9] Е.А. Гребенщикова, Н.В. Зотова, С.С. Кижасев, С.С. Молчанов, Ю.П. Яковлев. *ЖТФ*, **71** (9), 58 (2001).
- [10] J.R. Lindle, J.R. Meyer, C.A. Hoffman, F.J. Bartoli, G.W. Turner, H.K. Choi. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3153 (1995).
- [11] P. Adamiec, R. Bohdan, A. Bercha, F. Dybala, W. Trzeciakowski, Y. Rouillard, A. Joullie. *Phys. Status Solidi B*, **244**, 187 (2007).
- [12] K.J. Cheetham, A. Krier, I.P. Marko, A. Aldukhayel, S.J. Sweeney. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 141110 (2011).

- [13] Н.Л. Баженов, К.Д. Мынбаев, В.И. Иванов-Омский, В.А. Смирнов, В.П. Евтихийев, Н.А. Пихтин, М.Г. Растегаева, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, А.С. Школьник, Г.Г. Зегря. ФТП, **39**, 1252 (2005).
- [14] В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Ясиевич. *Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках* (СПб., Изд-во ПИЯФ РАН, 1997).
- [15] A.V. Ikuo, I.P. Marko, K. Hild, A.R. Adams, S. Arafin, M.C. Amann, S.J. Sweeney. *Sci. Reports*, **6**, 19 595 (2016).

Редактор Л.В. Шаронова

## Electroluminescence of InAs/InAs(Sb)/InAsSbP LED heterostructures in 4.2–300 K temperature range

*K.D. Mynbaev*<sup>1,2</sup>, *N.L. Bazhenov*<sup>1</sup>, *A.A. Semakova*<sup>1,2</sup>,  
*M.P. Mikhailova*<sup>1</sup>, *N.D. Stoyanov*<sup>3</sup>, *S.S. Kizhaev*<sup>3</sup>,  
*S.S. Molchanov*<sup>3</sup>, *A.P. Astakhova*<sup>3</sup>, *A.V. Chernyaev*<sup>1,3</sup>,  
*H. Lipsanen*<sup>2,4</sup>, *V.E. Bougrov*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> ITMO University,  
197101 St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Microsensor Technology,  
194223 St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup> Aalto University,  
02150 Aalto, Finland

**Abstract** Electroluminescence of InAs/InAsSbP and InAsSb/InAsSbP LED heterostructures grown on InAs substrates was studied in the temperature range  $T = 4.2\text{--}300\text{ K}$ . At low temperatures ( $T = 4.2\text{--}100\text{ K}$ ), stimulated emission was observed at the wavelengths  $3.03$  and  $3.55\ \mu\text{m}$  for InAs/InAsSbP and InAsSb/InAsSbP heterostructures, respectively, with optical resonator formed normal to the growth plane. The emission became spontaneous at  $T > 70\text{ K}$  due to the resonant „switch-on“ of CHHS Auger recombination process, when the energy of recombining electron–hole pair was transferred to a hole with hole transition into the spin–orbit-split band, and remained such up to the room temperature because of the influence of other Auger processes. The obtained results show that using structures based on InAs(Sb)/InAsSbP is promising for fabrication of vertical-emitting mid-infrared lasers.