

УДК 53.082.56

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОДИОДОВ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ InAs(Sb,P)

Н.К. Жумашев<sup>a</sup>, К.Д. Мынбаев<sup>b</sup>, Н.Л. Баженов<sup>b</sup>, Н.Д. Стоянов<sup>b,c</sup>, С.С. Кижаяев<sup>c</sup>, Т.И. Гурина<sup>c</sup>,  
А.П. Астахова<sup>c</sup>, А.В. Черняев<sup>c,b</sup>, С.С. Молчанов<sup>c</sup>, Х. Липсанен<sup>d</sup>, Х.М. Салихов<sup>e</sup>, В.Е. Бугров<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

<sup>c</sup> Микросенсор Технологии, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация

<sup>d</sup> Университет Аалто, Аалто, 02150, Финляндия

<sup>e</sup> Институт перспективных исследований АН РТ, Казань, 420111, Российская Федерация

Адрес для переписки: [mynkad@mail.ioffe.ru](mailto:mynkad@mail.ioffe.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 28.10.15, принята к печати 12.11.15

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-76-84

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Жумашев Н.К., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л., Стоянов Н.Д., Кижаяев С.С., Гурина Т.И., Астахова А.П., Черняев А.В., Молчанов С.С., Липсанен Х., Салихов Х.М., Бугров В.Е. Спектральные характеристики светодиодов среднего инфракрасного диапазона на основе InAs(Sb,P) // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. С. 76–84.

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрены спектральные характеристики светодиодов среднего инфракрасного диапазона с гетероструктурами на основе твердых растворов InAs(Sb,P), излучающих при температуре  $T=300$  К в диапазоне длин волн 3,4–4,1 мкм. Целью исследования был поиск путей увеличения эффективности светодиодов. **Методы.** Выращивание гетероструктур выполнено методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Спектры записывались на автоматизированной установке на основе монохроматора МДР-23 при импульсном возбуждении. Регистрация сигнала осуществлялась синхронным детектором с помощью охлаждаемого фотодиода на основе InSb. Сравнительное исследование спектров электролюминесценции светодиодов выполнено при температурах 300 К и 77 К. Проведено сопоставление полученных данных с результатами расчета зонных диаграмм гетероструктур. **Основные результаты.** По итогам сравнительного исследования спектров электролюминесценции светодиодов при температурах 300 К и 77 К установлено, что повышению их эффективности препятствует значительное влияние оже-рекомбинации. В светодиодных гетероструктурах InAs/InAsSb/InAsSbP при 77 К впервые наблюдался эффект возникновения стимулированного излучения из активной области InAsSb. Для гетероструктур с квантовыми ямами InAs/(InAs/InAsSb)/InAsSbP обнаружено, что при 77 К рекомбинация происходит вне материала ям, что указывает на недостаточную локализацию носителей в активной области структур. Таким образом, показано, что основными путями повышения эффективности исследованных светодиодов являются подавление оже-рекомбинации и улучшение пространственной локализации носителей в активной области. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы при разработке гетероструктур для светодиодов среднего инфракрасного диапазона.

### Ключевые слова

инфракрасный светодиод, электролюминесценция, рекомбинация

### Благодарности

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

## SPECTRAL CHARACTERISTICS OF MID-INFRARED LIGHT-EMITTING DIODES BASED ON InAs(Sb,P)

N.K. Zhumashev<sup>a</sup>, K.D. Mynbaev<sup>b</sup>, N.L. Bazhenov<sup>b</sup>, N.D. Stoyanov<sup>b,c</sup>, S.S. Kizhaev<sup>c</sup>, T.I. Gurina<sup>c</sup>,  
A.P. Astakhova<sup>c</sup>, A.V. Tchernyaev<sup>c,b</sup>, S.S. Molchanov<sup>c</sup>, H. Lipsanen<sup>d</sup>, Kh.M. Salikhov<sup>e</sup>, V.E. Bougrov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

<sup>c</sup> Microsensor Technology, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation

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

<sup>e</sup> Institute for Advanced Studies, Academy of Sciences of Tatarstan, Kazan, 420111, Russian Federation

Corresponding author: [mynkad@mail.ioffe.ru](mailto:mynkad@mail.ioffe.ru)

**Article info**

Received 28.10.15, accepted 12.11.15

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-76-84

Article in Russian

**For citation:** Zhumashev N.K., Mynbaev K.D., Bazhenov N.L., Stoyanov N.D., Kizhaev S.S., Gurina T.I., Astakhova A.P., Tchernyaev A.V., Molchanov S.S., Lipsanen H., Salikhov Kh.M., Bougrov V.E. Spectral characteristics of mid-infrared light-emitting diodes based on InAs(Sb,P). *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 76–84.

**Abstract**

**Subject of Study.** We consider spectral characteristics of mid-infrared light-emitting diodes with heterostructures based on InAs(Sb,P) emitting at  $T=300$  K in the wavelength range 3.4–4.1 micrometers. The aim of the study was to search for the ways of increasing the diode efficiency.

**Methods.** The heterostructures were grown from metal-organic chemical compounds with the use of vapor-phase epitaxial technique. The spectra were recorded under pulse excitation with the use of computer-controlled installation employing MDR-23 grating monochromator and a lock-in amplifier. InSb photodiode was used as a detector. Comparative study of electroluminescence spectra of the diodes was carried out at the temperatures equal to 300 K and 77 K. We compared the obtained data with the calculation results of the band diagrams of the heterostructures. **Main Results.** As a result of comparative study of the electroluminescence spectra of the diodes recorded at 300 K and 77 K we have established that increasing of their efficiency is hindered by substantial influence of Auger recombination. For the first time at 77 K we have observed the effect of stimulated emission from InAsSb active layer in light-emitting structures made of InAs/InAsSb/InAsSbP. For heterostructures with quantum wells InAs/(InAs/InAsSb)/InAsSbP we have found out that at 77 K the carrier recombination occurs outside quantum wells, which points out to the insufficient carrier localization in the active layer. Thus, we have shown that the efficiency of mid-infrared light-emitting diodes based on InAs(Sb,P) can be increased via suppression of Auger-recombination and improvement of carrier localization in the active region.

**Practical Relevance.** The results of the study can be used for development of heterostructures for mid-infrared light-emitting diodes.

**Keywords**

infrared light-emitting diode, electroluminescence, recombination

**Acknowledgements**

This work was financially supported by the Russian Government via funds allotted for the implementation of the Program for competitive growth of ITMO University among the leading world academic centres for 2013-2020.

**Введение**

Известно, что в средней инфракрасной (ИК) области спектра (диапазон длин волн 2–6 мкм) лежат характеристические полосы поглощения целого ряда важных химических соединений. Среди них вода и ее пары (длины волн поглощения 1,94 мкм и 2,55–2,8 мкм), метан (2,30 мкм и 3,30 мкм), двуокись углерода (2,65 мкм и 4,27 мкм), окись углерода (2,34 мкм и 4,67 мкм), окислы азота (4,08–4,44 мкм) и многие другие неорганические и органические вещества. Сенсоры этих веществ требуются как в промышленном производстве, так и для контроля состояния атмосферы и для бытовых нужд. Еще одним перспективным направлением использования сенсоров, работающих в средней ИК области спектра, является создание приборов неинвазивной (бесконтактной) медицинской диагностики (см., например, [1]).

Существует целый ряд оптических газоанализаторов, в которых используются тепловые источники ИК излучения. В этих приборах из широкого спектра излучения черного тела с помощью оптических фильтров вырезается нужный спектральный диапазон. Однако еще более перспективными являются ИК сенсоры на основе светодиодов. По сравнению с тепловыми источниками светодиоды обладают на три порядка более высоким быстродействием, гораздо меньшими размерами, более низкой потребляемой электрической мощностью, простотой конструкции (отсутствует необходимость в оптических фильтрах и вакуумировании), существенно большим временем жизни, а при массовом производстве – более низкой себестоимостью [2].

Разрабатываемые в настоящее время ИК светодиоды базируются на полупроводниковых соединениях  $A^{III}B^V$  и их твердых растворах, в частности, на твердых растворах соединений InAs, InSb, InP, GaSb и др. [3–8]. Основным недостатком существующих ИК светодиодов является их невысокая эффективность: мощность светодиодов среднего ИК диапазона обычно не превышает нескольких десятков микроватт. Для повышения эффективности светодиодов необходимо понимать процессы, происходящие в конкретной приборной структуре при генерации света. Для этого полезно исследовать работу светодиодов не только при рабочей температуре, которая обычно равна комнатной, но и при более низких температурах, поскольку в этом случае оказывается возможным более точно установить механизмы процессов, происходящих при протекании тока. В настоящей работе сообщается о результатах сравнительного исследования при температурах 300 K и 77 K спектральных характеристик ИК светодиодов на основе гетероструктур твердых растворов InAs(Sb,P), излучающих при комнатной температуре в диапазоне длин волн 3,4–4,1 мкм (длина волны в максимуме).

### Экспериментальные результаты

Гетероструктуры были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений в российской компании Микросенсор Технолоджи<sup>1</sup> по методике, аналогичной изложенной в работе [9]. Светодиодные чипы  $0,38 \times 0,38$  мм создавались методом стандартной фотолитографии и жидкостного химического травления. Применялась контактная система на основе многослойной композиции Cr–Au–Ni–Au. Сплошной контакт формировался на эпитаксиальной стороне структуры. Кольцевой контакт шириной 35 мкм и внутренним диаметром 200 мкм размещался на подложке InAs (легированной S) *n*-типа проводимости (концентрация электронов  $n \sim 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Образцы монтировались на корпуса ТО-18.

Как известно, InAs характеризуется малой эффективной массой электронов ( $m_e = 0,023m_0$  при температуре  $T = 300 \text{ K}$ ) и появлением вырождения при их концентрациях более  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , поэтому использование легированных подложек оправдано для создания светодиодов с выводом излучения через подложку. Здесь вырождение электронов в зоне проводимости и подъем уровня Ферми (эффект Мосса–Бурштейна) приводят к «просветлению» полупроводника для фотонов с энергией, равной номинальной ширине его запрещенной зоны, и сдвигу края поглощения в коротковолновую область [8]. Кроме того, использование сильно легированных подложек для получения светодиодных структур позволяет получить низкое последовательное сопротивление диода вследствие высокой проводимости  $n^+$ -InAs и малого контактного сопротивления.

Исследовались три группы гетероструктур. В гетероструктурах I группы (InAs/InAs/InAsSbP) активная область была изготовлена из бинарного соединения InAs. В структурах II группы (InAs/InAsSb/InAsSbP) активная область состояла из твердого раствора InAsSb с содержанием Sb 7 ат.%. Гетероструктуры III группы содержали в активной области множественные (108 периодов) квантовые ямы (КЯ) InAs/InAsSb с содержанием Sb в материале ямы 12 ат.%. Выращивание гетероструктур завершилось созданием широкозонного барьерного слоя из InAsSbP с содержанием P 20 ат.% и Sb 10 ат.%.

На рис. 1 представлена зонная диаграмма гетероструктуры II группы (с расчетной длиной волны в максимуме 3,8 мкм) с активной областью из InAsSb, построенная нами для температуры 300 K согласно принципам, изложенным в монографии [10] и параметрам (ширина запрещенной зоны твердых растворов  $E_g$ , энергия электронного сродства и т.п.), взятым из работ [11, 12]. Концентрация электронов в активной области составляла  $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Барьерная область была легирована акцепторной примесью (Zn) до концентрации дырок  $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . В этой структуре материал подложки является сильно вырожденным, активная область *n*-типа проводимости обладает низкой концентрацией электронов, а барьерный слой *p*-типа – высокой концентрацией дырок. Следует отметить, что представленная диаграмма является идеализированной. Диффузия Zn из барьерного слоя во время эпитаксии приводит к тому, что прилегающая к гетерогранице InAsSb/InAsSbP часть активной области приобретает дырочный тип проводимости, и рабочий *p-n*-переход оказывается сдвинут с гетерограницы InAsSb/InAsSbP в активную область InAsSb. Зонная диаграмма для гетероструктуры I группы (с длиной волны в максимуме 3,4 мкм) в целом была аналогична зонной диаграмме гетероструктуры II группы, разница заключалась лишь в другом значении  $E_g$  активной области, обуславливающим изменение длины волны излучения светодиода.

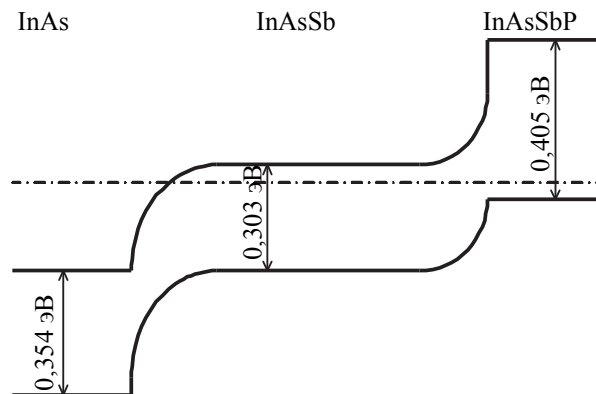


Рис. 1. Зонная диаграмма гетероструктуры II группы InAs/InAsSb/InAsSbP с содержанием в активной области Sb 7 ат.% при температуре 300 K. Штрих-пунктирной линией обозначен уровень Ферми в равновесии (при отсутствии смещения)

На рис. 2 представлены схематичные зонные диаграммы для одиночной КЯ гетероструктуры III группы (с длиной волны в максимуме 4,1 мкм) для температур 300 K и 77 K. Ширина ямы составляла 4 нм, толщина обкладки – 10 нм, концентрация электронов в материалах ямы InSb и обкладки InAsSb была равна  $8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Проведенный согласно принципам, изложенным в [13], расчет показал, что в та-

<sup>1</sup> lmsnt.com [Электронный ресурс]

кой гетероструктуре формируется уровень размерного квантования для дырок. При температуре  $T=300$  К для дырок имеется КЯ высотой 119 мэВ. При эффективной массе дырки  $m_h = 0,41m_0$  энергия уровня квантования составляет  $E_1 = 0,027$  эВ. Оптические переходы (показаны на рис. 2, а) должны происходить с энергией  $E_g + E_1 = 0,272 + 0,027 = 0,299$  эВ, что соответствует длине волны  $\lambda=4,14$  мкм. При температуре 77 К для дырок имеется КЯ высотой 130 мэВ, энергия уровня составляет  $E_1 = 0,028$  эВ, и переходы должны происходить с энергией  $E_g + E_1 = 0,314 + 0,028 = 0,342$  эВ, что соответствует  $\lambda=3,63$  мкм. Ни при 300 К, ни при 77 К квантования энергии электронов не происходит.

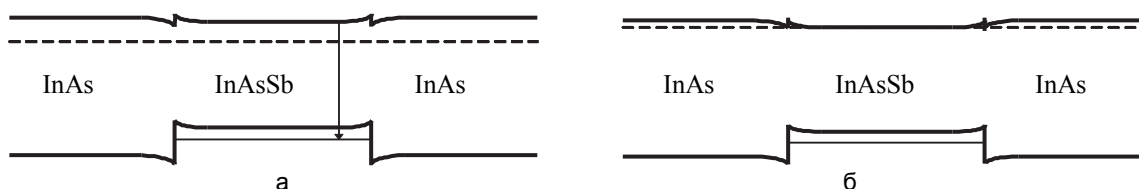


Рис. 2. Схематичный вид одиночной квантовой ямы InAs/InAsSb при температурах 300 К (а) и 77 К (б). Стрелкой показан переход из зоны проводимости на уровень размерного квантования дырок

Экспериментальное исследование спектральных характеристик ИК светодиодов проводилось в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Спектры электролюминесценции (ЭЛ) записывались при импульсном возбуждении при токе накачки до 4 А с частотой следования импульсов 1 кГц при длительности импульса 1 мкс на автоматизированной установке на основе монохроматора МДР-23. Сигнал регистрировался синхронным детектором с помощью охлаждаемого фотодиода на основе InSb.

На рис. 3 представлены спектры ЭЛ типичного образца из I группы (InAs/InAs/InAsSbP). При  $T=300$  К максимум спектра излучения соответствует длине волны  $\lambda=3,47$  мкм (рис. 3, а, и спектр 1 на рис. 3, б). Спектр хорошо описывался лоренцевым распределением, ширина спектра излучения на половине высоты (полуширина) составляла 291 нм. При  $T=77$  К максимум спектра излучения смещался в коротковолновую сторону и находился на  $\lambda=3,01$  мкм, а полуширина линии ожидаемо уменьшалась и становилась равной 184 нм (спектр 2 на рис. 3, б). Указанное температурное смещение пика ЭЛ соответствует изменению с температурой ширины запрещенной зоны материала активной области.

Помимо того факта, что при уменьшении температуры спектр в целом сохраняет свою форму, следует отметить значительное увеличение интенсивности излучения светодиода при  $T=77$  К. Так, спектры, представленные на рис. 3, б, были записаны при 300 К и 77 К при одинаковых условиях и при одном и том же токе накачки в 1 А (спектр при 300 К на рис. 3, а, записывался при более коротком оптическом тракте, не включавшем азотный криостат). Видно многократное (в 14 раз) усиление сигнала ЭЛ при температуре жидкого азота по сравнению с комнатной температурой.

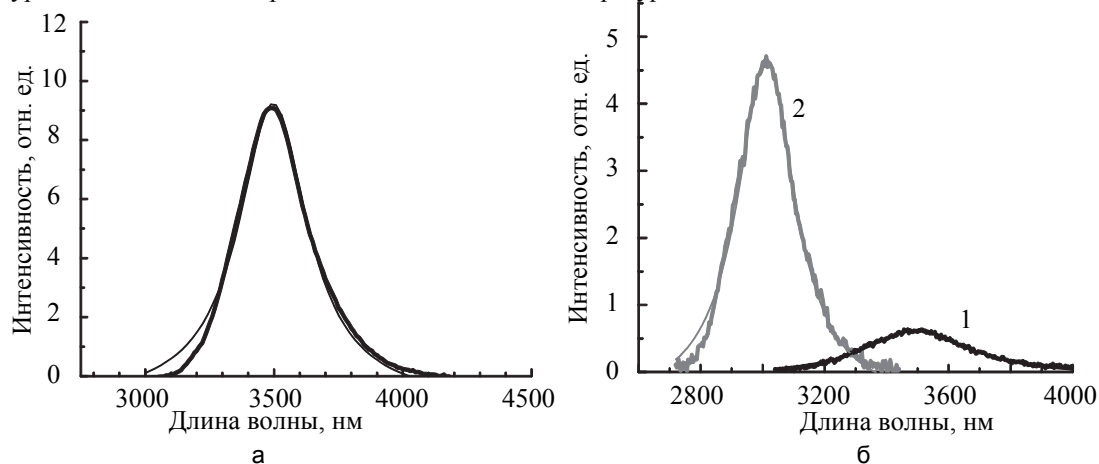


Рис. 3. Спектр электролюминесценции светодиода на основе гетероструктуры I группы InAs/InAs/InAsSbP при температуре 300 К (а) и спектры при температурах 300 К и 77 К, записанные в одинаковых условиях (б): 1 – 300 К; 2 – 77 К. Тонкими линиями показана аппроксимация спектров лоренцевым распределением

На рис. 4 представлены спектры ЭЛ светодиодов на основе гетероструктур II группы InAs/InAsSb/InAsSbP. Данные получены для разных светодиодных чипов, выколотых из одной исходной пластины. На рис. 4, а, представлен спектр светодиода, измеренный при коротком оптическом тракте. Данный спектр в целом удовлетворительно описывался лоренцевым распределением, искажение формы спектра, соответствовавшее длине волны 4,25 мкм, было вызвано поглощением двуокисью углерода в

атмосфере. Типичная полуширина линии ЭЛ при 300 К для образцов этой группы составляла 550 нм. Для этих образцов, как и для светодиодов I группы, наблюдалось значительное увеличение интенсивности излучения при  $T=77$  К. Для образца, спектр которого представлен на рис. 4, б, при температуре  $T=300$  К максимум спектра излучения находился на длине волны  $\lambda=3,79$  мкм (спектр 1, ток накачки 1 А), а при 77 К и токе накачки 0,05 А смещался к  $\lambda=3,42$  мкм (спектр 2). Такое поведение было аналогично наблюдаемому для образцов I группы. Однако для образцов II группы была установлена важная характерная особенность. Как видно на рис. 4, б, при изменении тока накачки от 0,05 А (спектр 2) до 0,1 А (спектр 3) при  $T=77$  К структура спектра не сохранялась. При повышении тока в спектре появлялась узкая линия, которая по мере возрастания тока становилась доминирующей. Более наглядно это демонстрирует рис. 4, в, на котором изображены спектры, измеренные при комнатной (спектр 1, ток накачки 1 А) и азотной (спектр 2, ток накачки 0,8 А) температурах для другого образца из II группы. По всей вероятности, здесь мы наблюдали эффект возникновения стимулированного излучения. На рис. 4, г, показана структура линии ЭЛ при возникновении такого эффекта (ток накачки 0,2 А) при  $T=77$  К для еще одного светодиода из данной группы, где каждый пик был аппроксимирован лоренцевой кривой (показаны тонкими линиями). Как видно, ширины отдельных пиков составляли единицы нанометров (вплоть до 2 нм).

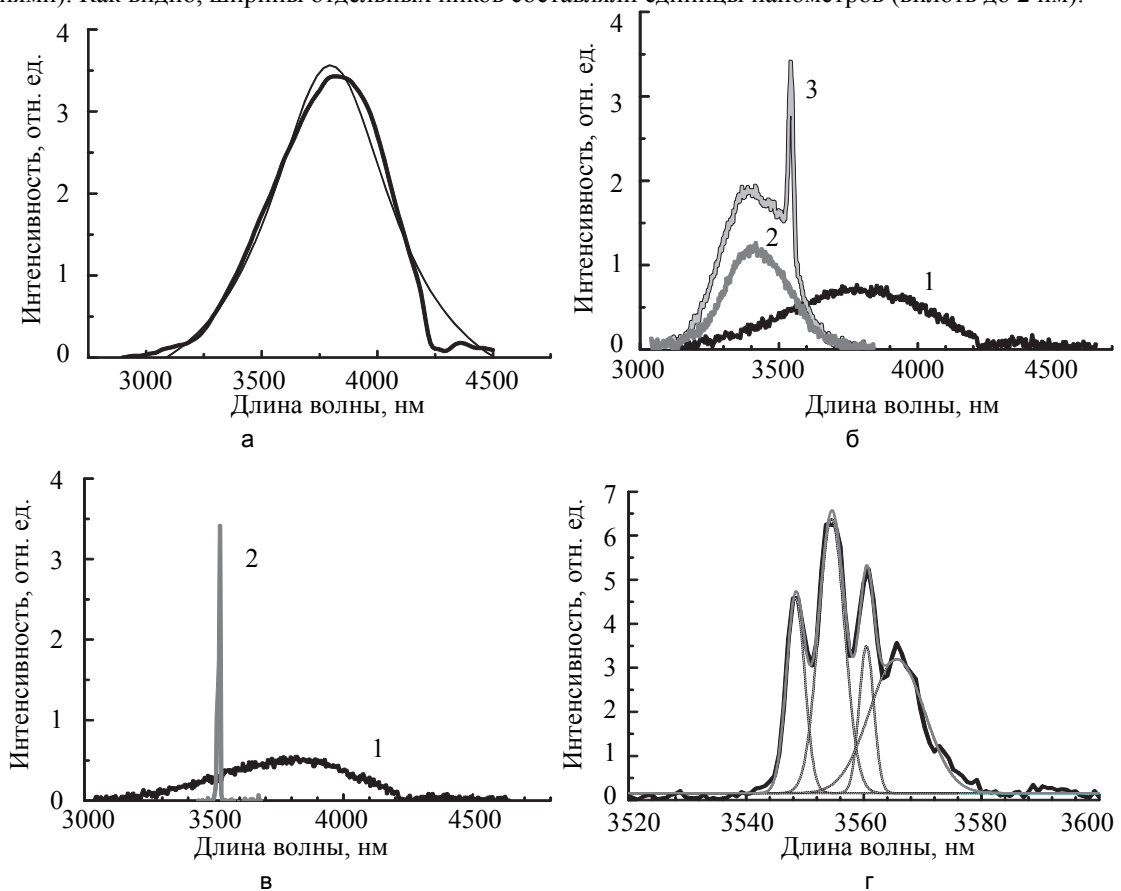


Рис. 4. Спектры электролюминесценции светодиодов II группы на основе гетероструктур InAs/InAsSb/InAsSbP:  $T=300$  К, короткий оптический тракт, тонкой линией показана аппроксимация спектра лоренцевым распределением (а);  $T=300$  К (кривая 1) и  $T=77$  К (токи накачки 0,05 А (кривая 2) и 0,1 А (кривая 3)) (б);  $T=300$  К (кривая 1) и  $T=77$  К (кривая 2) (в);  $T=77$  К, запись при большем спектральном разрешении, тонкие линии показывают аппроксимацию спектра суммой отдельных полос с лоренцевым распределением (г). Подробные пояснения – в тексте

На рис. 5 показаны спектры ЭЛ образца из III группы с КЯ. Типичная полуширина линии ЭЛ при 300 К для образцов этой группы составляла 650 нм. Форма спектра, представленного на рис. 5, а, и записанного при 300 К, значительно искажена на длинах волн, соответствующих 4,25 мкм и 4,27 мкм, характерных для поглощения  $\text{CO}_2$ . Максимум спектральной линии при 300 К находится на длине волны 4,0 мкм и в целом соответствует расчетному значению энергии переходов из зоны проводимости на уровень размерного квантования дырок (рис. 2). Можно было бы ожидать, что при понижении температуры до 77 К из-за роста ширины запрещенной зоны активного слоя пик будет быстро смещаться в сторону больших энергий. Однако, как видно из данных эксперимента, положение пика практически не меняется, лишь уменьшается его полуширина (спектры 1 (300 К) и 2 (77 К) на рис. 5, б). По мере увеличения тока накачки при 77 К происходит небольшой сдвиг спектра в сторону более коротких волн (спектры 3 и 4 на

рис. 5, б). Значительное увеличение интенсивности излучения светодиода при  $T=77$  К относительно 300 К наблюдалось и для этих гетероструктур.

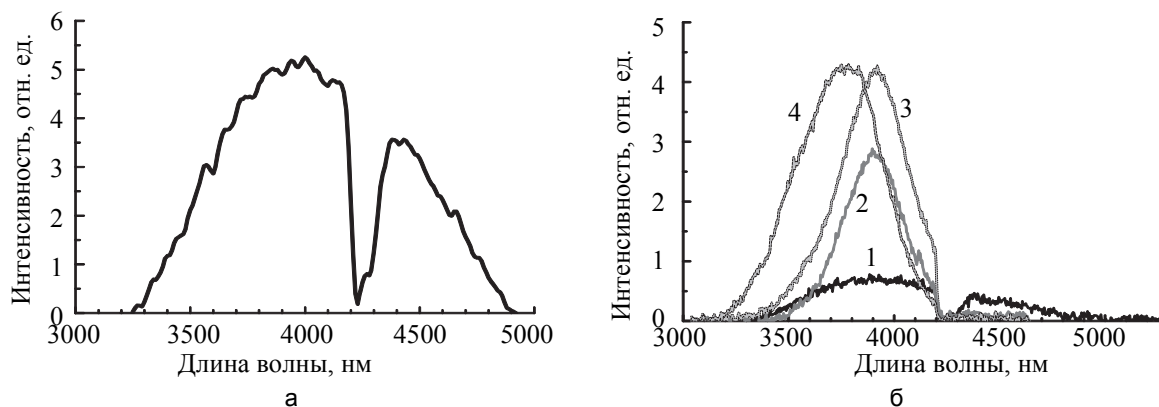


Рис. 5. Спектр электролюминесценции светодиода III группы с квантовыми ямами при температуре 300 К (а) и сравнение спектров электролюминесценции (б) при 300 К (кривая 1) и 77 К (кривые 2– 4), ток накачки: 1 – 2,6 А; 2 – 0,1 А; 3 – 1 А; 4 – 4 А

### Обсуждение полученных результатов

Экспериментальные и расчетные данные, полученные в работе, сведены в таблицу. Здесь  $\lambda$  – фактическая длина волны, соответствующая пику спектра ЭЛ (экспериментальная или расчетная, соответствующая расчетной величине запрещенной зоны активной области  $E_g$ );  $h\nu$  – определенная по экспериментальной длине волны энергия кванта. Для структур с КЯ приведены значения «оптической» ширины запрещенной зоны, учитывающие наличие уровня энергии размерного квантования дырок.

Структура	$T=300$ К				$T=77$ К			
	Эксперимент		Расчет		Эксперимент		Расчет	
	$\lambda$ , мкм	$h\nu$ , мэВ	$E_g$ , мэВ	$\lambda$ , мкм	$\lambda$ , мкм	$h\nu$ , мэВ	$E_g$ , мэВ	$\lambda$ , мкм
I	3,50	354	354	3,50	3,00	413	404	3,10
II	3,80	326	303	4,10	3,40	365	348	3,60
III	4,00	310	299	4,10	3,90	318	342	3,60

Таблица. Экспериментальные и расчетные данные для исследованных структур

Отметим, что для структур первой группы InAs/InAs/InAsSbP наблюдалось хорошее совпадение расчетных положений максимума спектра ЭЛ и экспериментальных данных, – как для комнатной температуры, так и для температуры 77 К. Энергия излучаемого кванта в данном случае практически совпала с расчетной шириной запрещенной зоны в активной области гетероструктуры; несколько бóльшая относительно расчетной энергия при температуре 77 К может объясняться формированием условий для высокого уровня инжекции и существенным увеличением концентрации носителей в активной области, сопровождающимся значительным сдвигом квазиуровня Ферми для электронов в зону проводимости вследствие эффекта Мосса–Бурштейна. Аналогичный эффект, по-видимому, имел место и для гетероструктур второй группы InAs/InAsSb/InAsSbP, но здесь он был выражен сильнее из-за более узкой запрещенной зоны активной области и проявлялся уже при комнатной температуре. Что касается наблюдения в структурах InAs/InAsSb/InAsSbP стимулированного излучения, то аналогичный эффект впервые наблюдался при 77 К во флип–чип светодиодах с активной областью из *n*-InAs [14]. Исследованные в работе [14] гетероструктуры были в целом аналогичны структурам, изучавшимся в настоящей работе. Наблюдение стимулированного излучения в структурах, описанных в [14], приписывалось формированию резонатора Фабри–Перо, расположенного перпендикулярно *p-n*-переходу и образованного границами раздела «полупроводник/воздух», с одной стороны, и «полупроводник/контактный металл», с другой стороны. В аналогичных структурах с активной областью из InAsSb авторами [14] подобный эффект не наблюдался, что связывалось ими с более высоким значением внутреннего квантового выхода в InAs по сравнению с InAsSb. Стимулированное излучение из InAsSb до сих пор наблюдалось в специально изготовленных лазерных структурах (см., например, [15, 16]). В отличие от авторов работы [14], мы наблюдали линии стимулированного излучения на длинноволновом краю спектра спонтанного излучения при 77 К, а не в его максимуме. Природа резонатора, обеспечивающего стимулированное излучение, требует дальнейших исследований, – возможно, что он образован сколами полупроводникового кристалла, а не границами раздела в чипе.

Если обратиться к структурам III группы (с КЯ), то отсутствие размерного квантования для электронов в этих структурах объясняет и меньшую длину волны излучения в этих структурах по сравнению с расчетной при 300 К, и коротковолновый сдвиг максимума линии излучения при увеличении тока инжекции – носители переходят на уровень размерного квантования для дырок из зоны проводимости, и при увеличении тока квазиуровень Ферми для электронов движется в эту зону так, как это происходит в структурах I и II групп с активной областью без КЯ. Следует обратить внимание на совпадение энергий излучаемых фотонов в структурах с КЯ при 300 К и 77 К (при малых токах инжекции в последнем случае). Изменение энергии кванта при изменении температуры в данном случае должно определяться изменением  $E_g$  материала КЯ (а оно составляет 42 мэВ при изменении энергии уровня квантования всего 1 мэВ), таким образом, трудно предположить, что наблюдаемое излучение при 77 К соответствует генерации фотонов в активной области гетероструктуры. Отметим при этом, что при  $T=77$  К энергия излучаемого фотона оказывается близка к  $E_g$  InAs. В связи с этим можно допустить, что при данной температуре генерация излучения происходила не в КЯ, а в материале InAs, т.е. необходимая для создания условий для излучательной рекомбинации локализация электронов и дырок в активной области светодиодной гетероструктуры не достигалась. В целом это наблюдение соответствует существующим в литературе представлениям о том, что достижению высокой квантовой эффективности светодиодов среднего ИК диапазона может препятствовать утечка носителей через гетеробарьеры [17, 18].

### Заключение

В работе проанализированы свойства выращенных методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений светодиодов с гетероструктурами на основе твердых растворов InAs(Sb,P), в том числе на основе структур с квантовыми ямами. Для всех структур интенсивность электролюминесценции при 77 К была намного больше интенсивности при 300 К, что указывало на значительное влияние ожерекомбинации, вклад которой, как известно, возрастает с увеличением температуры [19]. Для структур с активной областью из InAs и номинальной длиной волны при 300 К в 3,4 мкм наблюдалось хорошее совпадение расчетной и экспериментально определенной длины волны излучения как для комнатной температуры, так и для температуры 77 К. Несколько большая энергия кванта относительно расчетной при температуре 77 К была объяснена формированием условий для высокого уровня инжекции и существенным увеличением концентрации носителей в активной области, сопровождавшимся значительным подъемом квазиуровня Ферми для электронов в зону проводимости. Аналогичный эффект имел место и для гетероструктур с активной областью из InAsSb с номинальной длиной волны излучения при 300 К в 3,8 мкм, но здесь он был выражен сильнее из-за более узкой запрещенной зоны активной области и проявлялся уже при комнатной температуре. В светодиодных гетероструктурах InAs/InAsSb/InAsSbP при 77 К впервые наблюдался эффект стимулированного излучения. Наблюдалось излучение из квантовых ям InAs/(InAs/InAsSb)/InAsSbP при 300 К, при 77 К рекомбинация носителей в этих структурах, по всей видимости, происходила вне материала квантовых ям, что указывало на недостаточную локализацию носителей в активной области структур.

Полученные в работе результаты показывают, что основными путями повышения эффективности исследованных светодиодов являются подавление ожерекомбинации и поиск путей улучшения пространственной локализации рекомбинирующих носителей в активной области структур (путем, например, изменения дизайна гетероструктур).

### Литература

1. Стоянов Н.Д., Журтанов Б.Е., Астахова А.П., Именков А.Н., Яковлев Ю.П. Высокоэффективные светодиоды спектрального диапазона 1.6–2.4 мкм для медицинской диагностики и экологического мониторинга // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. № 8. С. 996–1009.
2. Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics / Ed. A. Krier. Berlin: Springer, 2006. 379 p.
3. Allerman A.A., Kutz S.R., Biefield R.M., Baucom K.C., Burkhart J.H. Development of InAsSb-based light emitting diodes for chemical sensing systems // Proceedings of SPIE. 1998. V. 3279. P. 126–133. doi: 10.1117/12.304418
4. Баженов Н.Л., Журтанов Б.Е., Мынбаев К.Д., Астахова А.П., Именков А.Н., Михайлова М.П., Смирнов В.А., Стоянов Н.Д., Яковлев Ю.П. Электролюминесценция в изотипных гетероструктурах n-GaSb/n-AlGaAsSb/n-GaInAsSb, обусловленная ударной ионизацией // Письма в журнал технической физики. 2007. Т. 33. № 23. С. 1–6.
5. Петухов А.А., Кижаев С.С., Молчанов С.С., Стоянов Н.Д., Яковлев Ю.П. Электрические и электролюминесцентные свойства светодиодов  $\lambda=3.85\text{--}3.95$  мкм на основе InAsSb в интервале температур 20–200°C // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. № 1. С. 73–76.
6. Stoyanov N.D., Salikhov Kh.M., Kalinina K.V., Kizhaev S.S., Chernyaev A.V. Super low power consumption middle infrared LED-PD optopairs for chemical sensing // Proceedings of SPIE. 2014. V. 8982. Art. 89821A. doi: 10.1117/12.2036277

7. Krier A., Yin M., Smirnov V., Batty P., Carrington P.J., Solovov V., Sherstnev V. The development of room temperature LEDs and lasers for the mid-infrared spectral range // *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*. 2008. V. 205. N 1. P. 129–143. doi: 10.1002/pssa.200776833
8. Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М. Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия. Обзор // *Физика и техника полупроводников*. 2008. Т. 42. № 6. С. 641–657.
9. Петухов А.А., Ильинская Н.Д., Кижяев С.С., Стоянов Н.Д., Яковлев Ю.П. Влияние температуры на электролюминесцентные свойства flip-chip светодиодов среднего ИК-диапазона ( $\lambda_{\max} \sim 3.4$  мкм) на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP // *Физика и техника полупроводников*. 2011. Т. 45. № 11. С. 1560–1563.
10. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. М.: Мир, 1975. 432 с.
11. Adachi S. Band gaps and refractive indices of AlGaAsSb, GaInAsSb and InPAsSb: key properties for a variety of the 2–4  $\mu\text{m}$  optoelectronic device applications // *Journal of Applied Physics*. 1987. V. 61. N 10. P. 4869–4876. doi: 10.1063/1.338352
12. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys // *Journal of Applied Physics*. 2001. V. 89. N 11. P. 5815–5875. doi: 10.1063/1.1368156
13. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. М.: Мир, 1974. Т. 1. 341 с.
14. Matveev B., Zotova N., Il'inskaya N., Karandashev S., Remennyi M., Stus N. Spontaneous and stimulated emission in InAs LEDs with cavity formed by gold anode and semiconductor/air interface // *Physica Status Solidi C: Conferences*. 2005. V. 2. N 2. P. 927–930. doi: 10.1002/pssc.200460343
15. Шерстнев В.В., Монахов А.М., Астахова А.П., Кислякова А.Ю., Яковлев Ю.П., Аверкиев Н.С., Krier A., Hill G. Полупроводниковые WGM-лазеры среднего инфракрасного диапазона // *Физика и техника полупроводников*. 2005. Т. 39. № 9. С. 1122–1128.
16. Monakhov A.M., Krier A., Sherstnev V.V. The effect of current crowding on the electroluminescence of InAs mid-infrared light emitting diodes // *Semiconductor Science and Technology*. 2004. V. 19. N 3. P. 480–484. doi: 10.1088/0268-1242/19/3/034
17. Koerperick E.J., Olesberg J.T., Hicks J.L., Prineas J.P., Boggess T.F., Jr. High-power MWIR cascaded InAs–GaSb superlattice LEDs // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2009. V. 45. N 7. P. 849–853. doi: 10.1109/JQE.2009.2013176
18. Sanjeev, Chakrabarti P. Generic model of an InAsSb/InAsSbP DH-LED for midinfrared (2–5  $\mu\text{m}$ ) applications // *Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications*. 2009. V. 3. N 6. P. 515–524.
19. Абакумов В.Н., Перель В.И., Ясиевич И.Н. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. СПб.: ПИЯФ РАН, 1997. 376 с.

<b>Жумашев Нариман Кульбаевич</b>	–	студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Z_n_k_z_m_b@mail.ru
<b>Мынбаев Карим Джафарович</b>	–	доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, mynkad@mail.ioffe.ru
<b>Баженов Николай Леонидович</b>	–	кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Bazhnil.ivom@mail.ioffe.ru
<b>Стоянов Николай Деев</b>	–	кандидат физико-математических наук, генеральный директор, Микросенсор Технолоджи, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация; старший научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ns@ledmicrosensor.com
<b>Кижяев Сергей Сергеевич</b>	–	кандидат физико-математических наук, главный технолог, Микросенсор Технолоджи, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация, s.kizhayev@ledmicrosensor.com
<b>Гурина Татьяна Игоревна</b>	–	руководитель группы, Микросенсор Технолоджи, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация, tigur@lmsnt.com
<b>Астахова Анастасия Павловна</b>	–	кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Микросенсор Технолоджи, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация, Astn74@mail.ru
<b>Черняев Антон Валентинович</b>	–	кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Микросенсор Технолоджи, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация; старший научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, chernyaevav@yandex.ru
<b>Молчанов Сергей Сергеевич</b>	–	руководитель технического отдела, Микросенсор Технолоджи, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация, smolch@mail.ru



- Липсанен Харри Калеви* – PhD, профессор, профессор, Университет Аалто, Аалто, 02150, Финляндия, harri.lipsanen@aalto.fi
- Салихов Хафиз Миргазямович* – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт перспективных исследований АН РТ, Казань, 420111, Республика Татарстан, hafizms@mail.ru
- Бугров Владислав Евгеньевич* – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Vladislav.bougrov@niuitmo.ru
- Nariman K. Zhumashev* – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Z\_n\_k\_z\_m\_b@mail.ru
- Karim D. Mynbaev* – D.Sc., Head of laboratory, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, mynkad@mail.ioffe.ru
- Nikolay L. Bazhenov* – PhD, Senior research scientist, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Bazhnil.ivom@mail.ioffe.ru
- Nikolay D. Stoyanov* – PhD, Chief executive officer, Microsensor Technology, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation; Senior Research Scientist, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ns@ledmicrosensor.com
- Sergei S. Kizhaev* – PhD, Chief process engineer, Microsensor Technology, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation, s.kizhayev@ledmicrosensor.com
- Tatiana I. Gurina* – Working group director, Microsensor Technology, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation, tigur@lmsnt.com
- Anastasiia P. Astakhova* – PhD, Research scientist, Microsensor Technology, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation, Astn74@mail.ru
- Anton V. Tchernyaev* – PhD, Research scientist, Microsensor Technology, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation; Senior researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, chernyaevav@yandex.ru
- Sergei S. Molchanov* – Head of Technical department, Microsensor Technology, Saint Petersburg, 194223, Russian Federation, smolch@mail.ru
- Harri K. Lipsanen* – PhD, Professor, Professor, Aalto University, 02150, Aalto, Finland, harri.lipsanen@aalto.fi
- Khafiz M. Salikhov* – D.Sc., Chief researcher, Institute for Advanced Studies, Academy of Sciences of Tatarstan, Kazan, 420111, Russian Federation, hafizms@mail.ru
- Vladislav E. Bougrov* – D.Sc., Chair Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Vladislav.bougrov@niuitmo.ru