

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-15-25

УДК 551.501.816, 551.510.411

Оптические переходы в длинноволновых светодиодных гетероструктурах на основе InAsSb

МАКСИМ СТАНИСЛАВОВИЧ РУЖЕВИЧ¹, АНТОНИНА АЛЕКСАНДРОВНА СЕМАКОВА²,
КАРИМ ДЖАФАРОВИЧ МЫНБАЕВ³, НИКОЛАЙ ЛЕОНИДОВИЧ БАЖЕНОВ⁴

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

^{2, 3, 4}Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

¹max.ruzhevich@niuitmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>

²antonina.semakova@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0741-1895>

³mynkad@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>

⁴bazhnil.ivom@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3019-2280>

Аннотация

Предмет исследования. Светодиодная гетероструктура $n\text{-InAs}/\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y/p\text{-InAsSbP}$ с мольной долей антимонида индия ($y = 0,15$), предназначенная для работы в длинноволновой области среднего инфракрасного диапазона спектра (длина волны более 4 мкм), и эпитаксиальные пленки $n^+\text{-InAs}/\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ ($y = 0\text{--}0,16$). **Цель работы.** Определение природы оптических переходов в длинноволновых светодиодных гетероструктурах на основе InAsSb для расширения диапазона работы излучателей на их основе в спектральную область длин волн более 4 мкм; снижение температурной зависимости длины волны излучения гетероструктур. **Метод.** Исследуемые гетероструктуры выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, светодиодный чип сформирован методами стандартной фотолитографии и химического травления. Оптические свойства полученных структур изучены методами фото- и электролюминесценции, химический состав пленок — методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на сканирующем электронном микроскопе, структурные свойства пленок — методом рентгеновской дифрактометрии. **Основные результаты.** Показано, что структурные и оптические свойства эпитаксиальных пленок $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ в существенной степени определяются содержанием антимонида индия в тройном твердом растворе. Показано существенное влияние излучательных переходов с участием интерфейсных состояний на гетерогранице пленка–подложка, а также не прямых рекомбинационных переходов на ступенчатом гетеропереходе II типа $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ в светодиодной гетероструктуре $n\text{-InAs}/\text{InAs}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}/p\text{-InAsSbP}$ при температурах ниже 150 К на оптические свойства структур. Показано, что изменение основного канала излучательной рекомбинации структур позволяет снизить влияние температуры на длину волны их излучения. **Практическая значимость.** Выявленный эффект изменения основного канала излучательной рекомбинации с изменением температуры демонстрирует перспективы изготовления температурно-стабильных светодиодов среднего инфракрасного диапазона спектра.

Ключевые слова: арсенид индия, антимониды, гетероструктуры, люминесценция

Благодарность: авторы выражают благодарность В.В. Романову, К.Д. Моисееву, С.С. Кижаву, А.В. Черняеву и Н.Д. Стоянову за предоставление структур для исследований, А.М. Смирнову — за проведение исследований методом рентгеновской дифракции и М.В. Дорогову — за проведение исследований методом сканирующей электронной микроскопии.

Ссылка для цитирования: Ружеви́ч М.С., Семакова А.А., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л. Оптические переходы в длинноволновых светодиодных гетероструктурах на основе InAsSb // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 7. С. 15–25. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-15-25>

Коды OCIS: 250.5230, 260.3060, 260.3800

Optical transitions in long-wavelength light-emitting diode heterostructures based on InAsSb

MAXIM S. RUZHEVICH¹, ANTONINA A. SEMAKOVA²,
KARIM D. MYNBAEV³, NIKOLAY L. BAZHENOV⁴

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

^{2, 3, 4}Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

¹max.ruzhevich@niuitmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>

²antonina.semakova@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0741-1895>

³mynkad@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>

⁴bazhnii.ivom@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3019-2280>

Abstract

Subject of study. n -InAs/InAs_{1- y} Sb _{y} / p -InAsSbP light-emitting diode heterostructure with indium antimonide molar fraction ($y = 0.15$) for long-wavelength (over 4 μm) region of the mid-infrared range and epitaxial n^+ -InAs/InAs_{1- y} Sb _{y} films ($y = 0-0.16$). **Aim of study.** Determination of the nature of optical transitions in long-wavelength InAsSb-based light-emitting diode heterostructures aimed at extension of the range of their operation to the spectral region of wavelengths over 4 μm ; decreasing the temperature dependence of the wavelength of heterostructures. **Method.** The heterostructures under study were grown by metal-organic vapor phase epitaxy, and the light-emitting diode chip was formed by standard photolithography and chemical etching. The optical properties of the resulting structures were studied by photo- and electroluminescence methods, the chemical composition of the films was studied by energy-dispersive X-ray spectroscopy on a scanning electron microscope, and the structural properties of the films were studied by X-ray diffractometry. **Main results.** It is shown that the structural and optical properties of InAs_{1- y} Sb _{y} epitaxial films are largely determined by the indium antimonide content in the ternary solid solution. A significant effect of radiative transitions involving interface states at the “film–substrate” heterointerface, as well as indirect recombination transitions at a step-like type II InAsSb/InAsSbP heterojunction in the n -InAs/InAs_{0.85}Sb_{0.15}/ p -InAsSbP light-emitting diode heterostructure at temperatures below 150 K on the optical properties of the structures is demonstrated. It is shown that switching of the main channel of radiative recombination of structures makes it possible to reduce the influence of temperature on their wavelength. **Practical significance.** The revealed effect of switching of the main channel of radiative recombination with temperature determines the prospects for the manufacture of temperature-stable light-emitting diodes for the mid-infrared range.

Keywords: indium antimonide, antimonides, heterostructures, luminescence

Acknowledgment: the authors are grateful to V.V. Romanov, K.D. Moiseev, S.S. Kizhaev, A.V. Chernyaev and N.D. Stoyanov for providing structures for research, A.M. Smirnov for conducting X-ray diffraction studies, and M.V. Dorogov for conducting research using scanning electron microscopy.

For citation: Ruzhevich M.S., Semakova A.A., Mynbaev K.D., Bazhenov N.L. Optical transitions in long-wavelength light-emitting diode heterostructures based on InAsSb [in Russian] // Opticheskiy Zhurnal. 2023. V. 90. № 7. P. 15–25. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-15-25>

OCIS codes: 250.5230, 260.3060, 260.3800

ВВЕДЕНИЕ

Оптические инфракрасные (ИК) детекторы на основе оптопары «светодиод-фотодиод», позволяющие проводить газоанализ при высокой точности измерений и небольшом объеме пробы, рассматриваются как наиболее перспективные устройства для экологического мониторинга, а также в медицине при измерении содержания углекислого газа в выдохе пациента [1, 2]. Тройной полупроводниковый твердый раствор $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ в зависимости от мольной доли антимонида индия позволяет охватить спектральный диапазон 3–12 мкм, что делает его незаменимым материалом при изготовлении, в частности, свето- и фотодиодных структур для детекторов средневолнового (3–5 мкм) ИК диапазона [3, 4].

На данный момент разработка длинноволновых (более 4 мкм) светодиодов данного сегмента ИК диапазона сдерживается сравнительно низким кристаллическим качеством эпитаксиальных слоев InAsSb с большой мольной долей InSb при их выращивании непосредственно на подложке InAs . Это связано с тем, что увеличение содержания InSb в твердом растворе InAsSb ведет к рассогласованию параметра кристаллической решетки нарастаемого твердого раствора относительно соответствующего параметра подложки, что в свою очередь приводит к генерации дислокаций и увеличению концентрации протяженных и точечных дефектов в целом. При этом необходимость в простых и относительно дешевых (по сравнению, например, с квантово-каскадными лазерами) источниках излучения для дальней границы средневолнового ИК диапазона достаточно велика: в частности, они требуются для анализа состава атмосферы и определения концентрации таких химических соединений, как монооксид азота (полоса поглощения вблизи 5,3 мкм).

Ранее нами исследовались некоторые спектральные свойства длинноволновых (5 мкм) светодиодных гетероструктур $n\text{-InAs}/\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y/p\text{-InAsSbP}$ ($y = 0,15\text{--}0,16$) [5]. В настоящей работе ставилась задача более детального исследования природы оптических переходов в подобных гетероструктурах. С этой целью были исследованы оптические свойства подложечного материала гетероструктур, а также эпитаксиальных пленок $n^+\text{-InAs}/\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ с мольной долей InSb ($y = 0\text{--}0,16$).

Целью настоящей работы являются определение природы оптических переходов в длинноволновых светодиодных гетероструктурах на основе InAsSb для расширения диапазона работы излучателей на их основе в спектральную область длин волн более 4 мкм и снижение температурной зависимости длины волны излучения подобных гетероструктур.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемые структуры были выращены методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений. Материалом подложки светодиодной гетероструктуры A $\text{InAs}/\text{InAs}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}/\text{InAsSbP}$, выращенной по методике, аналогичной изложенной в работе [6], был легированный $n^0\text{-InAs}$ с концентрацией электронов $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Поверх активной области $\text{InAs}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ в этой структуре выращивался широкозонный барьерный слой $p\text{-InAsSbP}$, легированный цинком. Светодиодный чип сформирован методами стандартной фотолитографии и химического травления и смонтирован на корпус ТО-18.

Эпитаксиальное осаждение пленок $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ проводилось по методике, аналогичной изложенной в работе [7], на сильно легированные донорной примесью (серой или оловом) подложки $n^+\text{-InAs}$ с концентрацией электронов $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Сами пленки не легировались и имели n -тип проводимости с концентрацией электронов 10^{16} см^{-3} , обусловленной остаточными примесями. Толщина пленок структуры B $n^+\text{-InAs}/\text{InAs}$ («контрольный» образец) составляла 0,4 мкм и 1 мкм структур C $n^+\text{-InAs}/\text{InAs}_{0,87}\text{Sb}_{0,13}$ и D $n^+\text{-InAs}/\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$.

Спектральные характеристики светодиодной гетероструктуры A исследовались методом электролюминесценции (ЭЛ). Спектры ЭЛ гетероструктуры и фотолюминесценции (ФЛ) пленок записывались при импульсном возбуждении (в случае ФЛ — полупроводниковым лазером с длиной волны излучения 1,03 мкм) с частотой 1 кГц и длительностью импульса 2 мкс в диапазоне температур 4,2–300 К. В качестве детектора использовался фотодиод InSb . Контроль химического состава пленок проводился методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ)

TESCAN MIRA 3. Для изучения структурных свойств пленок использовалась рентгеновская дифракция (РД); эти исследования были проведены при комнатной температуре (300 К) с использованием дифрактометра ДРОН-8 в щелевой конфигурации с острофокусной трубкой БСВ-29 с медным анодом и сцинтилляционным детектором NaI(Tl).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования ЭЛ светодиодной гетероструктуры А показали, что при низких температурах в диапазоне 4,2–150 К в спектре присутствовали две основные линии (рис. 1а). Высокоэнергетическая линия люминесценции при температуре $T = 4,2$ К имела максимум вблизи длины волны $\lambda = 3,084$ мкм (энергия фотона $h\nu_1 = 0,402$ эВ) и превосходила по интенсивности основную низкоэнергетическую полосу с максимумом на $\lambda = 4,251$ мкм ($h\nu = 0,292$ эВ). Полуширина (ширина на половине высоты) высокоэнергетической линии составила около 10 мэВ, низкоэнергетической полосы — около 50 мэВ. Было высказано предположение, что появление высокоэнергетической линии ЭЛ связано с рекомбинацией носителей в материале подложки [5]. Поскольку энергия пика этой линии при $T = 4,2$ К была меньше, чем значение ширины запрещенной зоны InAs (ширина запрещенной зоны $E_g = 0,417$ эВ [8]),

то можно было предположить, что присутствие этой линии вызвано оптическими переходами с участием акцепторных состояний, связанных с собственными дефектами и/или остаточными примесями. Это подтвердили проведенные нами исследования ФЛ материала подложки: спектр ФЛ при $T = 4,2$ К вблизи края поглощения (т.е. номинального значения E_g) здесь содержал две основные полосы (рис. 1б). Высокоэнергетическую полосу ($h\nu_3 = 0,415$ эВ) с меньшей интенсивностью в данном случае можно связать с межзонными переходами, а более интенсивную низкоэнергетическую ($h\nu_4 = 0,402$ эВ) — с примесной рекомбинацией, возможно, с участием донорно-акцепторных пар.

На рис. 2 представлены температурные зависимости энергии фотона в максимуме полос ФЛ подложки и ЭЛ светодиодной гетероструктуры. Эти зависимости сопоставлены с расчетными зависимостями E_g для InAs (рис. 2а) и эпитаксиального слоя InAs_{0,85}Sb_{0,15} (рис. 2б). Зависимость $E_g(T)$ определялась согласно соотношению Варши [9]

$$E_g = E_0 - \alpha T^2(T + \beta)^{-1}, \quad (1)$$

где коэффициенты $\alpha = 2,76 \times 10^{-4}$ эВ/К и $\beta = 93$ К соответствуют бинарному соединению InAs. Значение E_0 твердого раствора InAs_{1-y}Sb_y определялось как интерполяция

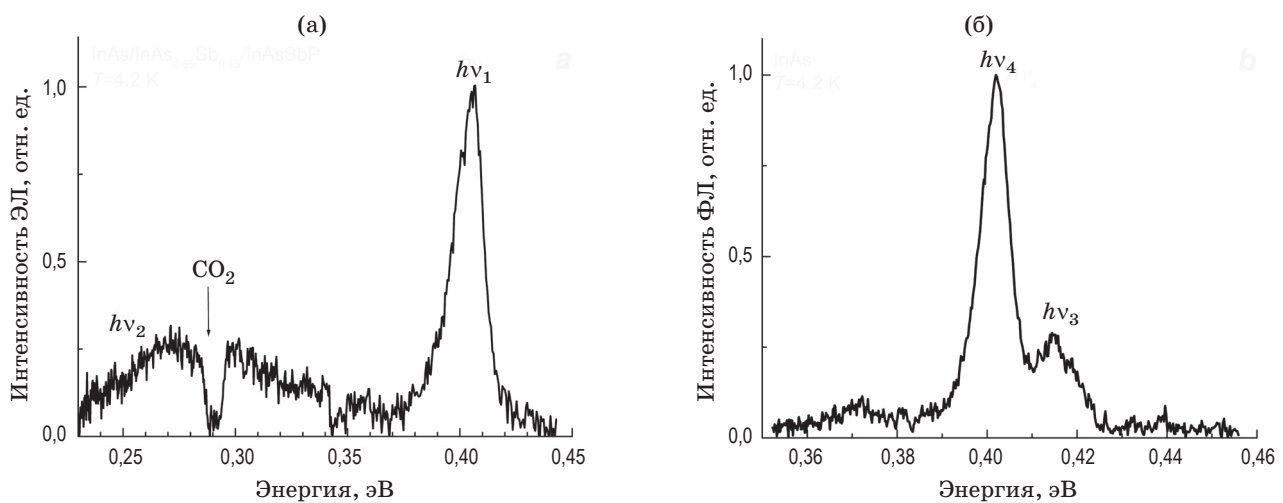


Рис. 1. Нормированные спектры электролюминесценции структуры А (а) и фотолюминесценции подложки InAs (б) при $T = 4,2$ К

Fig. 1. (a) Normalized electroluminescence spectrum of structure A and (б) photoluminescence spectrum of the InAs substrate at $T = 4.2$ K

долей бинарных соединений InAs и InSb согласно выражению [10]

$$E_0 = E_{g \text{ InAs}}(1 - y) + E_{g \text{ InSb}}y - C_{\text{InAsSb}}y(1 - y), \quad (2)$$

где согласно работе [8] при $T = 0$ К $E_{g \text{ InAs}} = 0,417$ эВ, $E_{g \text{ InSb}} = 0,235$ эВ и $C_{\text{InAsSb}} = 0,61$ эВ.

Как видно из рис. 2а, энергетический сдвиг спектров ФЛ подложки из InAs в длинноволновую область соответствует температурному сужению запрещенной зоны InAs. Это позволило сделать вывод о межзонном характере излучательной рекомбинации высокоэнергетической полосы излучения $h\nu_3$ во всем исследуемом интервале температур. Небольшое превышение энергии фотона $h\nu_3$ над E_g объясняется высоким уровнем возбуждения и превышением порога эффекта Бурштейна–Мосса, а также тем обстоятельством, что значение оптической ширины запрещенной зоны меньше, чем энергия пика ФЛ [11]. Низкоэнергетический примесный пик ФЛ $h\nu_4$ также в целом следует за температурным ходом E_g . По мере увеличения температуры относительная интенсивность межзонного пика $h\nu_3$ увеличивается, а примесного $h\nu_4$ — уменьшается

и при $T > 110$ К регистрация последнего стала невозможной. Аналогичное поведение наблюдается для высокоэнергетического пика спектра ЭЛ светодиодной гетероструктуры $h\nu_1$ (рис. 2б).

В противоположность этому у низкоэнергетической полосы спектра ЭЛ светодиодной гетероструктуры А в области низких температур $T < 150$ К наблюдается существенная разница между значением E_g активной области $\text{InAs}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ и энергией фотона $h\nu_2$ в максимуме полосы люминесценции (рис. 2б). Данное расхождение при $T = 4,2$ К составило около 24 мэВ. Температурное смещение полосы ЭЛ $h\nu_2$ в диапазоне $T = 4,2\text{--}200$ К было слабым. При этом следует отметить, что у гетероструктур с малым ($y < 0,7$) содержанием InSb в активной области ранее наблюдалось хорошее согласие значений $h\nu$ и E_g во всем диапазоне $T = 4,2\text{--}300$ К [11].

Исследования свойств пленок $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ были проведены с использованием комбинации структурных и оптических методов согласно традиционной схеме изучения подобных объектов [12–15].

Анализ химического состава пленок методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии проводился на различных участках поверхности, а также по толщине пленки.

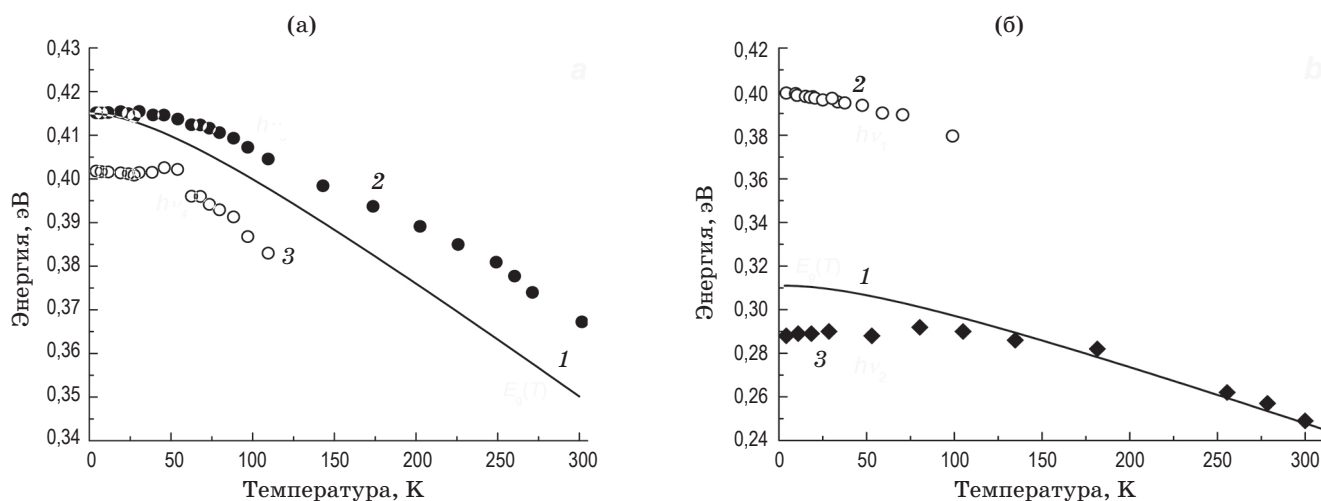


Рис. 2. Температурные зависимости энергии фотона в максимуме полос ФЛ подложки InAs (а: $h\nu_3$ — 2, $h\nu_4$ — 3) и ЭЛ светодиодной гетероструктуры А (б: $h\nu_1$ — 2, $h\nu_2$ — 3), соответствующие расчетные зависимости E_g (1)

Fig. 2. Temperature dependences of the photon energy at the maximum of the (а: $h\nu_3$ designated as 2, $h\nu_4$ designated as 3) photoluminescence bands of the InAs substrate and (б: $h\nu_1$ designated as 2, $h\nu_2$ designated as 3) electroluminescence bands of the light-emitting diode heterostructure А, (1) the corresponding calculated E_g dependences

В таблице представлены данные, полученные для слоя твердого раствора $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ (структура *D*) в четырех точках анализа, которые демонстрируют удовлетворительную однородность химического состава выращенного твердого раствора $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ по поверхности пленки. Аналогичный результат получен и при исследовании образца *C*, в котором процентное содержание элементов также соответствовало заявленному химическому составу.

Рентгеновские дифрактограммы исследованных пленок $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ (не показаны) были схожими и содержали пики при углах $2\theta \approx 29,5, 61,2$ и $99,4^\circ$, которые могли быть отнесены к отражениям от кристаллографических плоскостей InAs (200), (400) и (600) соответственно. Кривые качания РД были записаны при отражении от плоскости InAs (400) и представлены на рис. 3.

Полуширина кривой качания спектра РД пленки InAs составила около $2'$. Такое малое значение указывает на высокое структурное

качество эпитаксиальной пленки. При переходе к твердым растворам $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ ($y > 0$) и увеличении мольной доли InSb наблюдалось увеличение полуширины кривой качания. Так, полуширина кривой пленки состава $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ составила около $25'$, что свидетельствовало о снижении структурного качества пленок $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ ($y > 0$) относительно InAs . При этом изображения СЭМ, полученные с поверхности и сколов структур, не выявили формирования значимых макродефектов в пленках.

На рис. 4 представлены спектры ФЛ структур *B* и *C*, записанные при $T = 4,2$ К. Видно, что в спектре структуры *B* вблизи края поглощения присутствует две основных полосы люминесценции с максимумами при $h\nu_5 = 0,413$ эВ и $h\nu_6 = 0,398$ эВ. Низкоэнергетическая полоса спектра ФЛ структуры *B* регистрировалась до температуры 35 К. Различие в энергии положения спектральных максимумов $h\nu_5 - h\nu_6$ в 15 мэВ соответствует энергии залегания мелкого акцептора в нелегированном InAs [16–18]

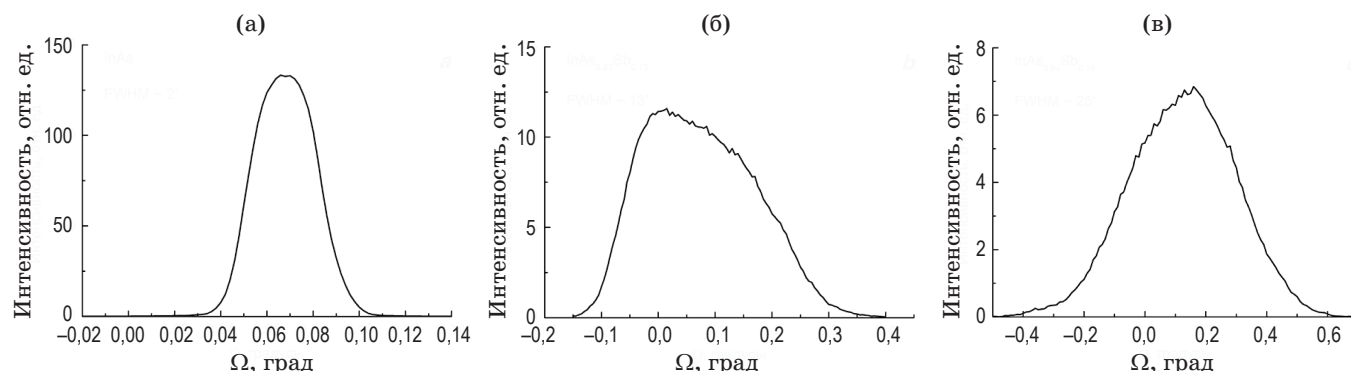


Рис. 3. Кривые качания спектров РД структур *B* (а), *C* (б) и *D* (в). Полуширина кривых качания спектров РД пленки InAs составила около $2'$ (а), пленки $\text{InAs}_{0,87}\text{Sb}_{0,13}$ — $13'$ (б), $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ — около $25'$ (в)

Fig. 3. Rocking curves for the XRD spectra of structures (a) *B*, (б) *C*, and (в) *D*. The half-width of the rocking curves of the XRD spectra of (a) the InAs film was about $2'$, (б) the $\text{InAs}_{0,87}\text{Sb}_{0,13}$ film was about $13'$, and (в) the $\text{InAs}_{0,84}\text{Sb}_{0,16}$ film was about $25'$

Данные элементного анализа структуры *D*
Elemental analysis data of structure *D*

Элемент	Средний массовый %				
	участок 1	участок 2	участок 3	участок 4	центр
As	33,14	33,59	32,95	32,76	33,10
In	58,09	58,31	57,98	57,56	57,45
Sb	8,77	8,10	9,07	9,67	9,45

(см. также рис. 1б и 2а). Таким образом, низкоэнергетическая ($h\nu_6$) полоса спектра ФЛ структуры *B* определялась оптическими переходами с участием относительно неглубоких акцепторных уровней. Спектр ФЛ структуры *C* содержал одну широкую полосу с пиком при $h\nu_7 = 0,279$ эВ.

Как видно из рис. 4, с увеличением мольной доли InSb в $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ помимо сдвига спектра ФЛ в длинноволновую сторону наблюдается рост полуширины линии с 5 мэВ (структура

B, рис. 4а) до 10 мэВ (структура *C*, рис. 4б), а также падение интенсивности люминесценции, видимое на рисунке как уменьшение отношения сигнал/шум. Спектр ФЛ структуры *D* (не показан) был сильно искажен из-за поглощения излучения молекулами углекислого газа, присутствующего в атмосфере; это обстоятельство не позволило в данном случае точно определить положение максимума спектральной линии ($h\nu_8 \approx 0,29$ эВ, $\lambda \approx 4,2$ мкм) и ее полуширину.

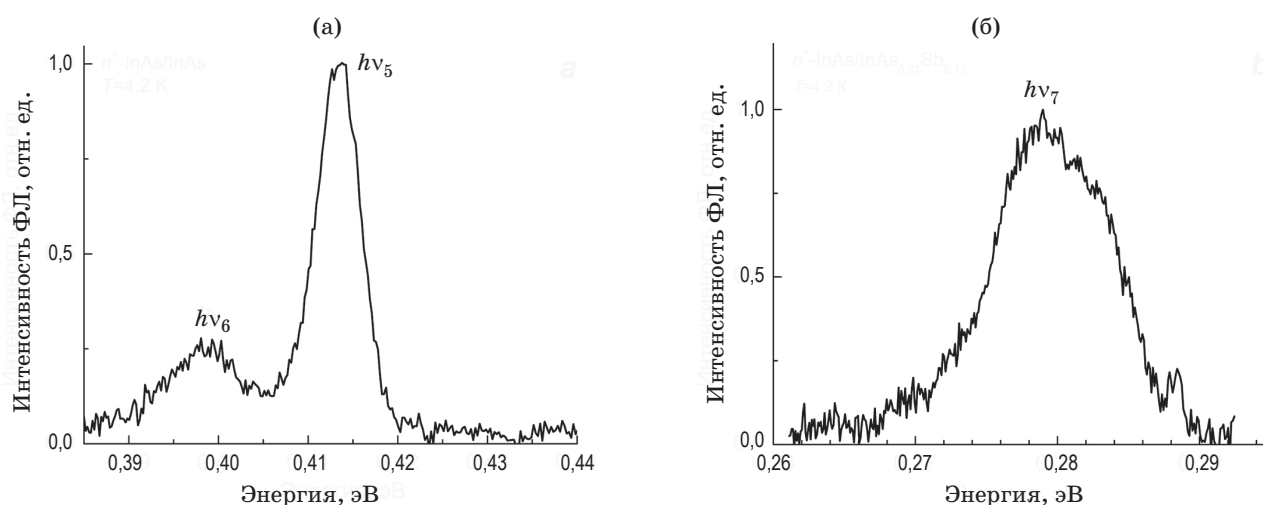


Рис. 4. Нормированные спектры фотолюминесценции структур *B* (а) и *C* (б) при $T = 4,2$ К

Fig. 4. Normalized photoluminescence spectra of structures (a) *B* and (б) *C* at $T = 4.2$ K

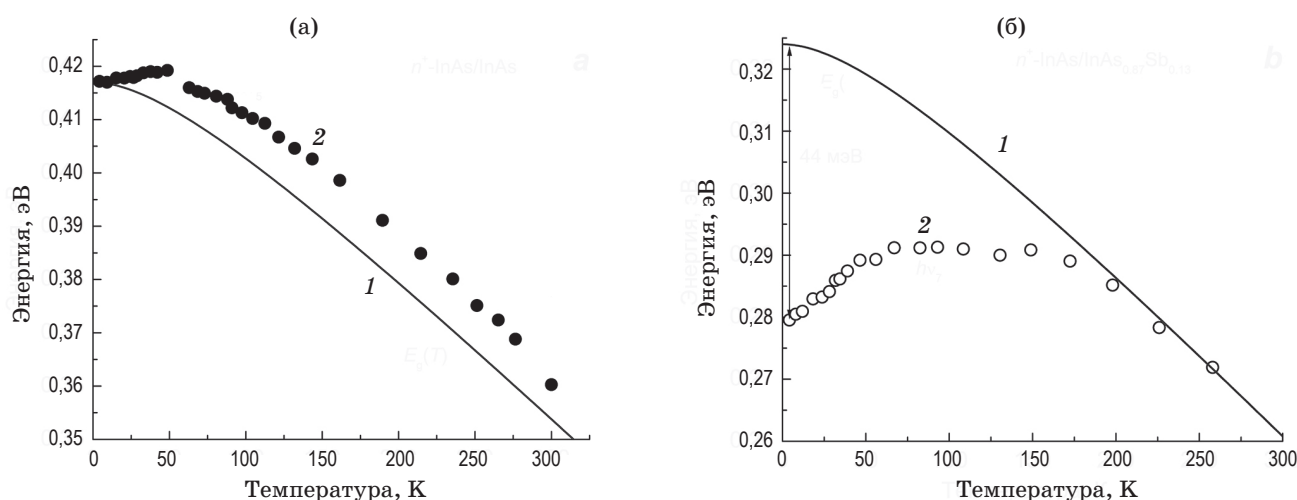


Рис. 5. Расчетные температурные зависимости ширины запрещенной зоны пленок $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ (1) и экспериментальные значения энергии фотона в максимуме полос фотолюминесценции ($h\nu_5$ (а) и $h\nu_7$ (б) — 2) структур *B* (а) и *C* (б)

Fig. 5. Calculated temperature dependences of (1) the bandgap of the $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ films and experimental values of the photon energy at the maximum of the photoluminescence bands ($h\nu_5$ (а) and $h\nu_7$ (б) denoted as 2) for structures (а) *B* and (б) *C*

По экспериментальным данным построены температурные зависимости энергии фотона в максимуме полос ФЛ. Эти зависимости были сопоставлены с расчетными зависимостями E_g эпитаксиальных пленок $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y$. Как видно из рис. 5а, энергетический сдвиг высокоэнергетической полосы $h\nu_5$ спектров ФЛ в длинноволновую область структуры В при $T > 50$ К соответствует температурному сужению запрещенной зоны InAs . Это позволяет сделать вывод о межзонном характере излучательной рекомбинации для этой полосы во всем исследуемом интервале температур. Небольшое превышение $h\nu$ над E_g здесь также объясняется высоким уровнем возбуждения и превышением порога эффекта Бурштейна–Мосса. При $T < 50$ К энергия фотона не вполне следовала за значением E_g , что может быть вызвано либо формированием высокоэнергетической полосы ФЛ оптическими переходами на мелкий акцептор [17], либо несовершенством модели Варшны [13, 14].

У структур С и D при низких температурах ($T < 50$ К), как и в случае низкоэнергетической полосы ЭЛ структуры А, наблюдалось существенное различие в энергии между энергией фотона и расчетными значениями E_g . Так, в случае структуры С при $T = 4,2$ К это энергетическое расхождение составило около 44 мэВ (рис. 5б). Более того, в интервале температур от 4,2 до 70 К наблюдалось смещение положения полосы ФЛ $h\nu_7$ в сторону больших энергий фотона с ростом температуры. Аналогичная картина наблюдалась и в случае структуры D, где энергетическое расхождение $h\nu - E_g$ имело значение того же порядка. Сдвиг в «голубую» область спектра для этих структур составил $(1,3\text{--}1,9) \times 10^{-4}$ эВ/К.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [5] было высказано предположение, что для гетеропереходов $\text{InAs}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{InAsSbP}$ с большим y , каковой является структура А, характерно пространственное разделение носителей заряда на гетерогранице, обусловленное образованием при прямом смещении потенциальных ям отдельно для электронов и для дырок. Когда концентрация носителей заряда преодолевает некоторое критическое значение, инициируется туннельная излучательная рекомбинация, и в температурном

диапазоне $4,2 < T < 180$ К положение пика люминесценции определяется перекрытием зон гетероперехода. При $T > 180$ К, как видно на рис. 2б, экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетной кривой $E_g(T)$ для материала активной области $\text{InAs}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$, построенной по выражению (1). Таким образом, при высоких температурах ($180 < T < 300$ К) в спектрах ЭЛ структуры А наблюдаются пики, природа которых связана с межзонными оптическими переходами в объеме активной области.

Высокоэнергетические полосы в спектре ЭЛ структуры А, в свою очередь, очевидно, связаны с рекомбинацией на гетеропереходе $\text{InAs}/\text{InAsSb}$. Поскольку в данном случае была использована нелегированная подложка, оптические переходы происходили в InAs , а не в более узкозонном материале InAsSb , где скорости безызлучательной рекомбинации существенно выше [19]. Аналогичные эффекты ранее наблюдались при исследовании ЭЛ гетеропереходов $n\text{-InAs}/n\text{-InAsSbP}$, где в случае использования нелегированной подложки интерфейсная рекомбинация приводила к излучению фотонов с энергией $h\nu \approx E_g \text{ InAs}$, а в случае сильнолегированной подложки с высоким коэффициентом безызлучательной рекомбинации — с энергией $h\nu \approx E_g \text{ InAsSbP}$ [5, 20].

При выращивании эпитаксиальных пленок В, С и D были использованы сильно легированные подложки, излучательная рекомбинация в которых была подавлена. Зарегистрированные при $T = 90$ К спектры ФЛ этих подложек (не показаны) имели малую интенсивность и полуширину спектральной линии 100–120 мэВ с энергией максимума около 0,46 эВ. Это соответствует межзонным оптическим переходам в материале InAs , легированном до концентраций 10^{18} см^{-3} . Подобное излучение не было зарегистрировано при записи спектров ФЛ эпитаксиальных пленок.

Характерный для пленок С и D «аномальный» характер температурной зависимости длины волны излучения ранее наблюдался в спектрах ФЛ и ЭЛ гетероструктур с активными слоями InAsSb [21, 22] и сверхрешеток $\text{InAs}/\text{InAsSb}$ [23]. Возможными причинами этого эффекта считались доминирование оптических переходов с участием примесей или локализованных состояний на гетеропе-

переходе InAs/InAsSb (в данном случае также может образоваться гетероструктура II типа) либо флуктуации состава твердого раствора [24]. Однако трудно ожидать, что при переходе от InAs к InAsSb энергия залегания акцепторов изменится столь существенно (с 15 до 45 мэВ), также маловероятным можно считать формирование столь глубоких флуктуаций состава в рассматриваемых твердых растворах с малой долей ионности химической связи. Расчет зонной диаграммы гетеропереходов структур *C* и *D* показал наличие относительно небольших разрывов зон проводимости и валентной ($\Delta E_C = 0,04$ эВ и $\Delta E_V = 0,14$ эВ — структура *C* и $\Delta E_C = 0,05$ эВ и $\Delta E_V = 0,16$ эВ — структура *D*, $T = 100$ К). Потенциальных ям для носителей в этом случае не образуется, однако, учитывая специфику формирования гетеропереходов с твердыми растворами с высоким содержанием InSb [6], можно ожидать появления на гетерогранице интерфейсных состояний. Таким образом, наблюдаемые оптические переходы в рассматриваемых структурах с эпитаксиальными пленками InAsSb при низких (до 150 К) температурах, как и в случае низкоэнергетической полосы ЭЛ структуры *A*, вызваны рекомбинацией носителей на гетеропереходе. С дальнейшим повышением температуры, очевидно, в спектрах ФЛ структур *C* и *D* проявляются уже межзонные переходы в объеме твердого раствора InAs_{1-y}Sb_y снова аналогично случаю низкоэнергетической полосы ЭЛ структуры *A*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты изучения природы оптических переходов в длинноволновых светодиодных гетероструктурах на основе InAsSb. Для их получения проведены исследования электролюминесценции светодиодной гетероструктуры n^0 -InAs/InAs_{0,85}Sb_{0,15}/p-InAsSbP и фотолюминесценции эпитаксиальных пленок n^+ -InAs/InAs_{1-y}Sb_y близких химических составов.

Показано, что структурные и оптические свойства пленок в существенной степени определяются рассогласованием постоянной кристаллической решетки тройного твердого раствора InAsSb и подложки InAs, возрастающим с увеличением мольной доли InSb в твердом растворе. В результате определяющим фактором природы оптических переходов в рассматриваемых структурах при низких температурах ($T < 200$ К) становятся наличие интерфейсных состояний на гетерогранице пленка-подложка InAs/InAsSb, а также возможность не прямых рекомбинационных переходов на ступенчатом гетеропереходе II типа InAsSb/InAsSbP в светодиодной гетероструктуре. При более высоких температурах в рассматриваемых структурах доминируют межзонные оптические переходы. Можно отметить, что изменение основного канала рекомбинации с интерфейсного на межзонный снижает температурный сдвиг длины волны излучения светодиода, что перспективно для производства температурно-стабильных источников средневолнового ИК излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hodgkinson J., Tatam R.P. Optical gas sensing: A review // *Measurement Sci. and Technol.* 2013. V. 24. № 1. P. 012004. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012004>
2. Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А. и др. Диодные оптопары на основе InAsSb для сенсоров углекислого газа, работающих в режиме реального времени // *ЖТФ*. 2018. Т. 88. Вып. 9. С. 1433–1438. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.09.46433.35-18>
Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A., Kapralov A.A., et al. InAsSb diode optical pairs for real-time carbon dioxide sensors // *Technical Physics*. 2018. V. 63. № 9. P. 1390–1395. <https://doi.org/10.1134/S1063784218090025>
3. Rogalski A., Martyniuk P., Kopytko M., et al. InAsSb-based infrared photodetectors: Thirty years later on // *Sensors*. 2020. V. 20. № 24. P. 7047. <https://doi.org/10.3390/s20247047>
4. Ongstad A.P., Kaspi R., Dente G.C., et al. Wavelength tuning limitations in optically pumped type-II antimonide lasers // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. № 14. P. 141106. <https://doi.org/10.1063/1.2904702>
5. Семакова А.А., Романов В.В., Баженов Н.Л. и др. Подавление температурной зависимости длины волны излучения в светодиодных структурах со ступенчатым гетеропереходом II типа InAsSb/InAsSbP // *Физика и техника полупроводников*. 2021. Т. 55. № 3. С. 277–281. <https://doi.org/10.21883/FTP.2021.03.50607.9549>
Semakova A.A., Romanov V.V., Bazhenov N.L., et al. Suppressing the temperature dependence of the wavelength in heterostructures with a staggered type-II InAsSb/InAsSbP heterojunction // *Semiconductors*. 2021. V. 55. № 3. P. 354–358. <https://doi.org/10.1134/S1063782621030155>
6. Романов В.В., Иванов Э.В., Моисеев К.Д. Узкозонные гетероструктуры InAs_{1-y}Sb_y/InAsSbP ($y = 0.09$ – 0.16) для спектрального диапазона 4–6 μm , полученные методом МОГФЭ // *ФТТ*. 2019. Т. 61. Вып. 10. С. 1746–1752. <https://doi.org/10.21883/FTT.2019.10.48244.483>

- Romanov V.V., Ivanov E.V., Moiseev K.D. InAs_(1-y)Sb_y/InAsSbP narrow-gap heterostructures ($y = 0.09-0.16$) grown by metalorganic vapor phase epitaxy for the spectral range of 4–6 μm // *Physics of the Solid State*. 2019. V. 61. № 10. P. 1699–1706. <https://doi.org/10.1134/S1063783419100305>
7. Sopanen M., Koljonen T., Lipsanen H., et al. Growth of GaInAsSb using tertiarybutylarsine as arsenic source // *J. Crystal Growth*. 1994. V. 145. № 1–2. P. 492–497. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(94\)91097-9](https://doi.org/10.1016/0022-0248(94)91097-9)
 8. Landolt-Börnstein Numerical Data. Ser. III. Handbook. V. 17a / ed. by Madelung O. Berlin–Heidelberg: Springer, 1982.
 9. Varshni Y.P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors // *Physica*. 1967. V. 34. № 1. P. 149–154. [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(67\)90062-6](https://doi.org/10.1016/0031-8914(67)90062-6)
 10. van Vechten J.A., Bergstresser T.K. Electronic structures of semiconductor alloys // *Phys. Rev. B*. 1970. V. 1. № 8. P. 3351–3357. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.1.3351>
 11. Mynbaev K.D., Bazhenov N.L., Semakova A.A., et al. Spontaneous and stimulated emission in InAsSb-based LED heterostructures // *Infrared Phys. and Technol.* 2017. V. 85. P. 246–250. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.07.003>
 12. Taghipour Z., Rogers V., Ringel B., et al. Photoluminescence spectroscopy of metamorphic InAsSb on GaAs and Si // *J. Luminescence*. 2020. V. 228. P. 117581. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117581>
 13. Tong J.C., Xie Y.Y., Ni P.N., et al. InAs_{0.91}Sb_{0.09} photoconductor for near and middle infrared photo-detection // *Physica Scripta*. 2016. V. 91. № 11. P. 115801. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/91/11/115801>
 14. Webster P.T., Riordan N.A., Liu S., et al. Measurement of InAsSb bandgap energy and InAs/InAsSb band edge positions using spectroscopic ellipsometry and photoluminescence spectroscopy // *J. Appl. Phys.* 2015. V. 118. № 24. P. 245706. <https://doi.org/10.1063/1.4939293>
 15. Svensson S.P., Sarney W.L., Hier H., et al. Band gap of InAs_{1-x}Sb_x with native lattice constant // *Phys. Rev. B*. 2012. V. 86. № 24. P. 245205. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.245205>
 16. Fisher M., Krier A. Photoluminescence of epitaxial InAs produced by different growth methods // *Infrared Phys. and Technol.* 1997. V. 38. № 7. P. 405–413. [https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(97\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(97)00032-7)
 17. Lacroix Y., Tran C.A., Watkins S.P., et al. Low-temperature photoluminescence of epitaxial InAs // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 80. P. 6416–6424. <https://doi.org/10.1063/1.363660>
 18. Есина Н.П., Зотова Н.В. Механизмы рекомбинации избыточных носителей тока в арсениде индия и твердых растворах на его основе // *Физика и техника полупроводников*. 1980. Т. 14. Вып. 2. С. 316–322. Esina N.P., Zotova N.V. Mechanisms of recombination of excess current carriers in indium arsenide and solid solutions based on it [in Russian] // *Physics and Technology of Semiconductors*. 1980. V. 14. № 2. P. 316–322.
 19. Баженов Н.Л., Мынбаев К.Д., Семакова А.А. и др. Время жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках с близкими значениями запрещенной зоны и спин-орбитального отщепления // *Физика и техника полупроводников*. 2019. Т. 53. Вып. 4. С. 450–455. <https://doi.org/10.21883/FTP.2019.04.47437.9004> Bazhenov N.L., Mynbaev K.D., Semakova A.A., et al. Carrier lifetime in semiconductors with band-gap widths close to the spin-orbit splitting energies // *Semiconductors*. 2019. V. 53. № 4. P. 428–433. <https://doi.org/10.1134/S1063782619040043>
 20. Григорьев М.М., Иванов Э.В., Моисеев К.Д. Интерфейсная электролюминесценция в изотипном гетеропереходе II типа InAs/InAsSbP при комнатной температуре // *Физика и техника полупроводников*. 2011. Т. 45. Вып. 10. С. 1386–1391. Grigoryev M.M., Ivanov E.V., Moiseev K.D. Interfacial luminescence in an InAs/InAsSbP isotype type II heterojunction at room temperature // *Semiconductors*. 2011. V. 45. № 10. P. 1334–1338. <https://doi.org/10.1134/S1063782611100071>
 21. Mao Y., Krier A. Uncooled 4.2 μm light emitting diodes based on InAs_{0.91}Sb_{0.09}/GaSb grown by LPE // *Opt. Mater.* 1996. V. 6. № 1–2. P. 55–61. [https://doi.org/10.1016/0925-3467\(96\)00011-0](https://doi.org/10.1016/0925-3467(96)00011-0)
 22. Steenbergen E.H., Massengale J.A., Ariyawans G., et al. Evidence of carrier localization in photoluminescence spectroscopy studies of mid-wavelength infrared InAs/InAs_{1-x}Sb_x type-II superlattices // *J. Luminescence*. 2016. V. 178. P. 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.06.020>
 23. Smolka T., Motyka M., Romanov V.V., et al. Photoluminescence spectroscopy of the InAsSb-based p-n heterostructure // *Mater.* 2022. V. 15. № 4. P. 1419. <https://doi.org/10.3390/ma15041419>
 24. Yen Y.M., People R., Wecht K.W. Long wavelength (3–5 and 8–12 μm) photoluminescence of InAs_{1-x}Sb_x grown on (100) GaAs by molecular-beam epitaxy // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. № 2. P. 952–954. <https://doi.org/10.1063/1.341904>

АВТОРЫ

Максим Станиславович Ружевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57427011200; <https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>; max.ruzhevich@niuitmo.ru

Антонина Александровна Семакова — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 57200733286; <https://orcid.org/0000-0002-0741-1895>; antonina.semakova@mail.ioffe.ru

AUTHORS

Maxim S. Ruzhevich — PhD Student, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57427011200; <https://orcid.org/0000-0002-4513-6345>; max.ruzhevich@niuitmo.ru

Antonina A. Semakova — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research Scientist, Ioffe Institute of the RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 57200733286; <https://orcid.org/0000-0002-0741-1895>; antonina.semakova@mail.ioffe.ru

Карим Джафарович Мынбаев — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 6602141057; <https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>; mynkad@mail.ioffe.ru

Николай Леонидович Баженов — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 6603050470; <https://orcid.org/0000-0002-3019-2280>; bazhnil.ivom@mail.ioffe.ru

Статья поступила в редакцию 28.02.2023
Одобрена после рецензирования 14.04.2023
Принята к печати 29.05.2023

Karim D. Mynbaev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences (Habilitation), Head of laboratory, Ioffe Institute of the RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 6602141057; <https://orcid.org/0000-0002-9853-8874>; mynkad@mail.ioffe.ru

Nikolay L. Bazhenov — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Scientist, Ioffe Institute of the RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 6603050470; <https://orcid.org/0000-0002-3019-2280>; bazhnil.ivom@mail.ioffe.ru

The article was submitted to the editorial office 28.02.2023
Approved after review 14.04.2023
Accepted for publication 29.05.2023