Люминесценция $p-n$-гетероструктур на основе InAs, InAsSb и InAsSbP

© А.А. Климов, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Р.Э. Кунков, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, А.А. Усикова

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

E-mail: a.klimov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 22 июля 2026 г.
Принята к публикации 22 июля 2026 г.

Сообщается о результатах исследования фото- и электролюминесценции $p-n$-гетероструктур с активными областями на основе InAs и твердых растворов InAsSb и InAsSbP в области составов, обеспечивающих значения ширины запрещенной зоны активной области $E_g = 110-480$ мэВ при комнатной температуре. Приведены данные об эффективности электролюминесценции (англ. — wall-plug efficiency) и проведено сравнение с расчетными значениями внутренней квантовой эффективности при наличии оже-рекомбинации. Сообщается о достижении эффективности, равной 2% при токе инжекции 10 мА в светодиодах с длиной волны 3.4 мкм (22 °C), и сделаны предположения о причинах уменьшения квантовой эффективности, связанных с рекомбинацией Оже-1 в узкозонном твердом растворе InAsSb.

Ключевые слова: InAsSb, InAs, InAsSbP, средневолновые ИК светодиоды, фотолюминесценция $A^{III}B^{V}$, электролюминесценция 3–5 мкм.

DOI: 10.61011/FTP.2026.06.63898.9828

1. Введение

Источники излучения для средневолновой ИК области спектра ($\lambda = 3-8$ мкм) являются необходимым элементом оптических датчиков химического состава, беспроводных оптических систем связи и аппаратуры для тестирования тепловизионных систем. В указанной области наибольшее развитие за последние годы получили светодиоды (СД) на основе квантово-размерных структур, в которых максимальные значения кпд (WPE — wall plug efficiency) при комнатной температуре составили 0.7% ($\lambda = 3.7$ мкм) [1], 0.4% ($\lambda = 3.2$ мкм) [2] и 1% ($\lambda = 4.0$ мкм) [3]. Подобные источники излучения характеризуются высокими рабочими напряжениями, что не всегда удобно при их использовании. В данной работе исследуются люминесцентные свойства $p-n$-гетероструктур и СД с активными областями на основе InAs и твердых растворов InAsSb и InAsSbP в области составов, обеспечивающих значения ширины запрещенной зоны активной области $E_g = 110-480$ мэВ и низкие напряжения смещения при комнатной температуре.

2. Экспериментальные результаты

Двойные гетероструктуры N-InAsSbP/InAs(Sb,P)/P-InAsSbP были получены методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложках InAs (100) n-типа проводимости. Характерные толщины слоев составляли: 2–5 мкм (N-InAsSbP), 2–3 мкм (InAs(Sb,P)), 1–2 мкм (P-InAsSbP). $p-n$-Переход создавался при легировании атомами Zn, при этом активная область в различных гетероструктурах либо преднамеренно не легировалась, либо в ней формировался плавный $p-n$-переход заданием профиля легирования. Измерения фотолюминесценции (ФЛ) проводились на эпитаксиальных структурах при освещении слоя P-InAsSbP в геометрии „на отражение“. Источником возбуждения ФЛ служил полупроводниковый лазер с длиной волны 1074 нм, имевший выходную мощностью 5 Вт при импульсном режиме питания ($\tau = 5$ мкс, $f = 500$ Гц). Измерения электролюминесценции (ЭЛ) проводились на образцах светодиодов „флип-чип“ конструкции с зеркальным анодным контактом, наклонными стенками мезы диаметром 100–200 мкм при минимально возможной толщине подложки (10–30 мкм), иммерсионно сопряженной с линзой из Si или Ge диаметром 3.5 мм с оптическим просветлением. По нашим оценкам, описанная конструкция увеличивала эффективность вывода ЭЛ излучения до 3 раз по сравнению с планарной поверхностью чипа. Регистрация люминесценции в импульсном режиме проводилась с использованием фурье-спектрометра ФСМ 2201 и охлаждаемых фотоприемников на основе InSb и HgCdTe.

На рис. 1 и 2, a приведены спектры ФЛ и ЭЛ $p-n$-гетероструктур с активными областями, содержащими InAsSbx ($x \leq 0.38$), InAs и изопериодные к InAs ($y \approx 2.2x$) твердые растворы $InAsSb_xP_y$ ($x \leq 0.075$) при температуре $T = 296$ K, а на рис. 2, b — значения энергии в максимуме спектров в зависимости от состава активной области и их аппроксимация функцией из работы [4,5], описывающей значения ширины запрещенной

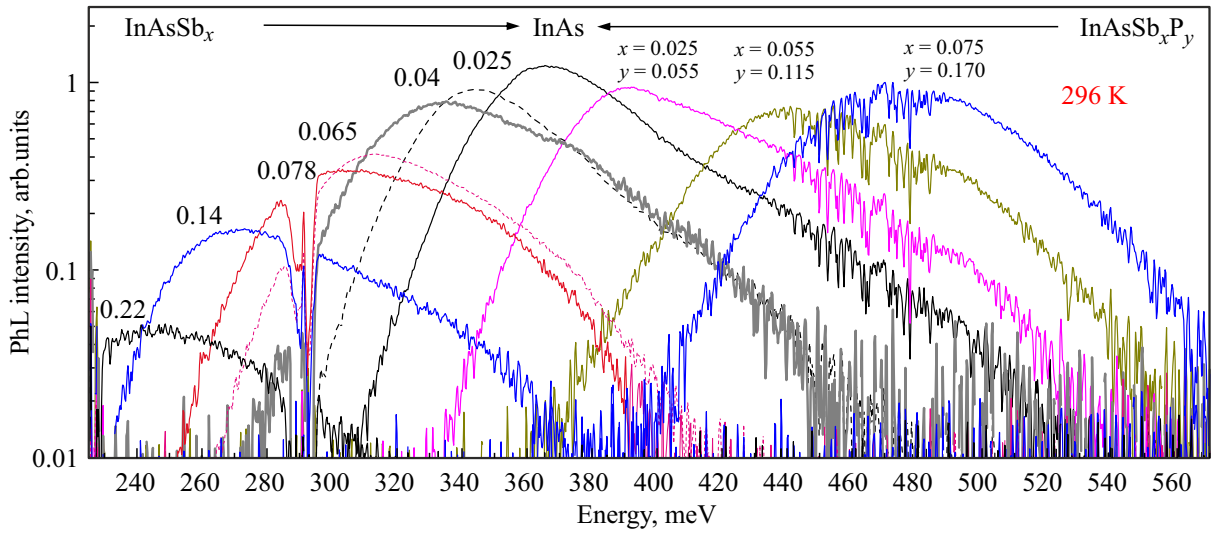


Рис. 1. Спектры ФЛ p–n-гетероструктур с активными областями, содержащими $InAs_{1-x}Sb_x$ ($x \leq 0.22$), InAs, $InAs_{1-x-y}Sb_xP_y$ ($y \approx 2.2x$, $x \leq 0.075$) при $T = 296$ K.

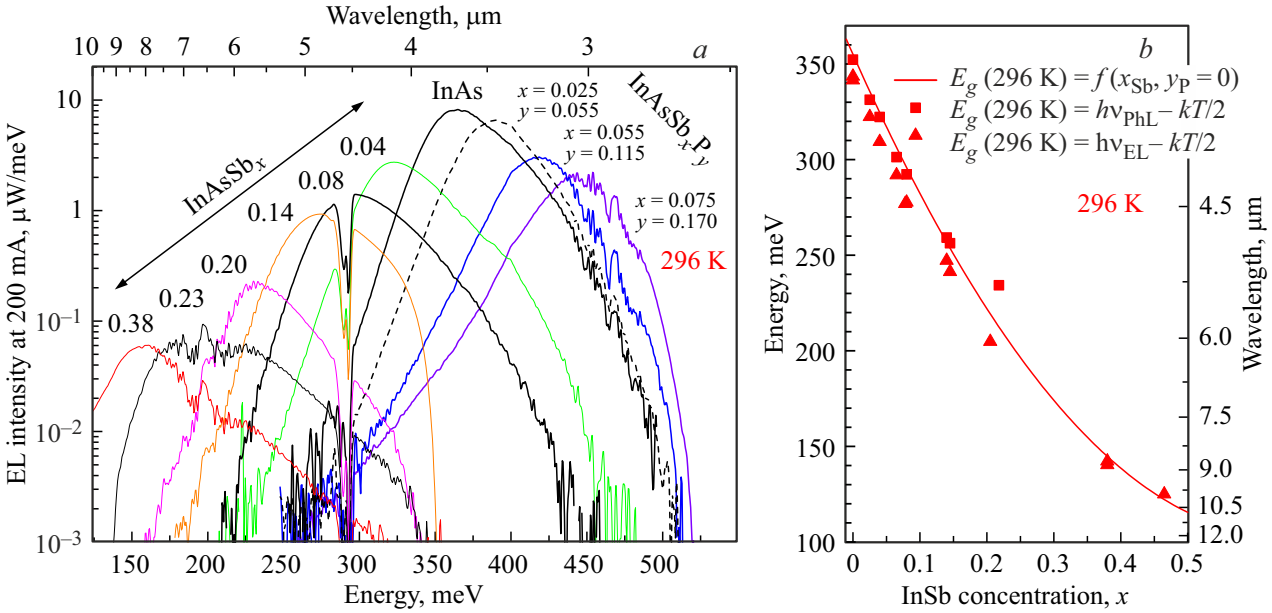


Рис. 2. Спектры ЭЛ p–n-гетероструктур с активными областями, содержащими $InAs_{1-x}Sb_x$ ($x \leq 0.38$), InAs, $InAs_{1-x-y}Sb_xP_y$ ($y \approx 2.2x$, $x \leq 0.075$) (*a*), значения энергий, соответствующих ширине запрещенной зоны активной области, полученные из данных по фото- и электролюминесценции (*b*) при $T = 296$ K.

зоны твердого раствора $InAs_{1-x-y}Sb_xP_y$:

$$E_g(x) = E_g^{\mathrm{InSb}}x + E_g^{\mathrm{InP}}y + E_g^{\mathrm{InAs}}(1-x-y) - C_g^{\mathrm{InAsSb}}x(1-x-y) - C_g^{\mathrm{InAsP}}y(1-x-y) - C_g^{\mathrm{InSbP}}xy, \quad (1)$$

где $C_g^{\mathrm{SolidSolution}}$ — параметры прогиба; для $C_g^{\mathrm{InAsSb}} = 0.62$ эВ [4]. Аппроксимация в данном случае выполнялась при $y = 0$, однако данное выражение будет использовано нами далее при расчете внутренней квантовой эффективности в слоях InAsSb и InAsSbP, и поэтому приведено полностью. Как видно из рис. 2, *b*, зависимость ширины запрещенной зоны твердого раствора $InAs_{1-x}Sb_x$ от содержания InSb наилучшим образом описывается при коррекции значений E_g на энергию залегания акцепторного уровня Zn $E_a = 10$ мэВ.

На рис. 3 приведены зависимости мощности ЭЛ и интенсивности ФЛ p–n-гетероструктур (*a*) и напряжения на p–n-структуре при токах накачки 10 и 200 мА (*b*) от энергии в максимуме излучения ($T = 296$ K). Как видно из представленных данных, зависимости мощности ЭЛ и интенсивности ФЛ имеют максимум в области энергий,

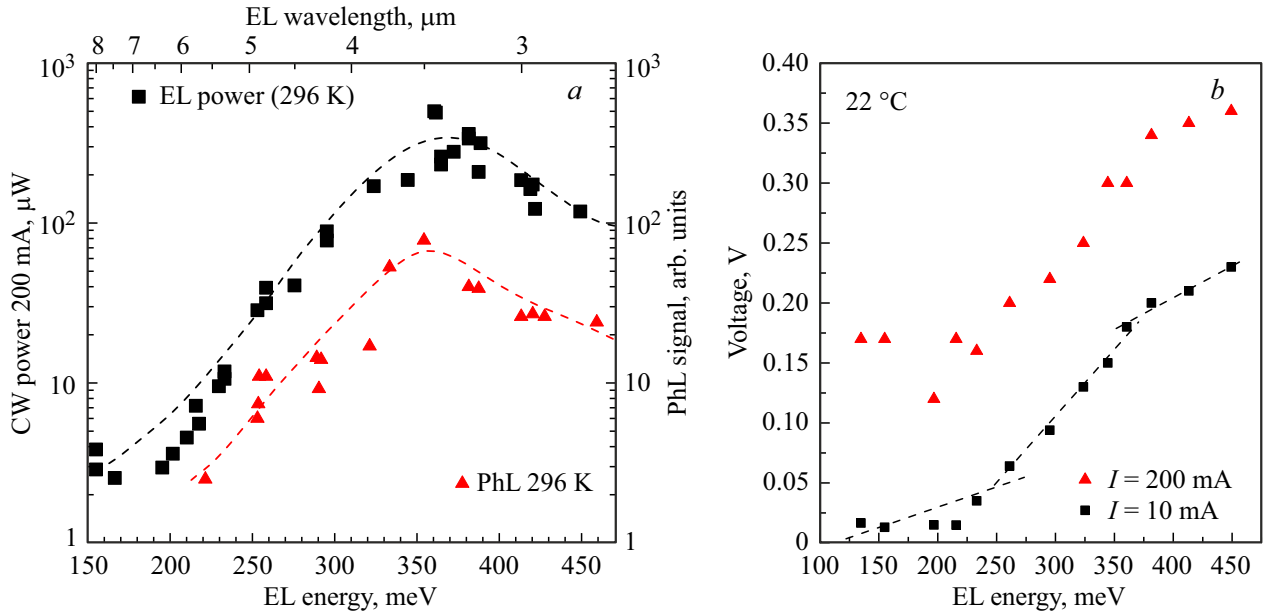


Рис. 3. Зависимости мощности ЭЛ и интенсивности ФЛ p–n-гетероструктур (a) и напряжения при токе накачки 10 и 200 мА (b) от энергии в максимуме излучения (T = 296 K).

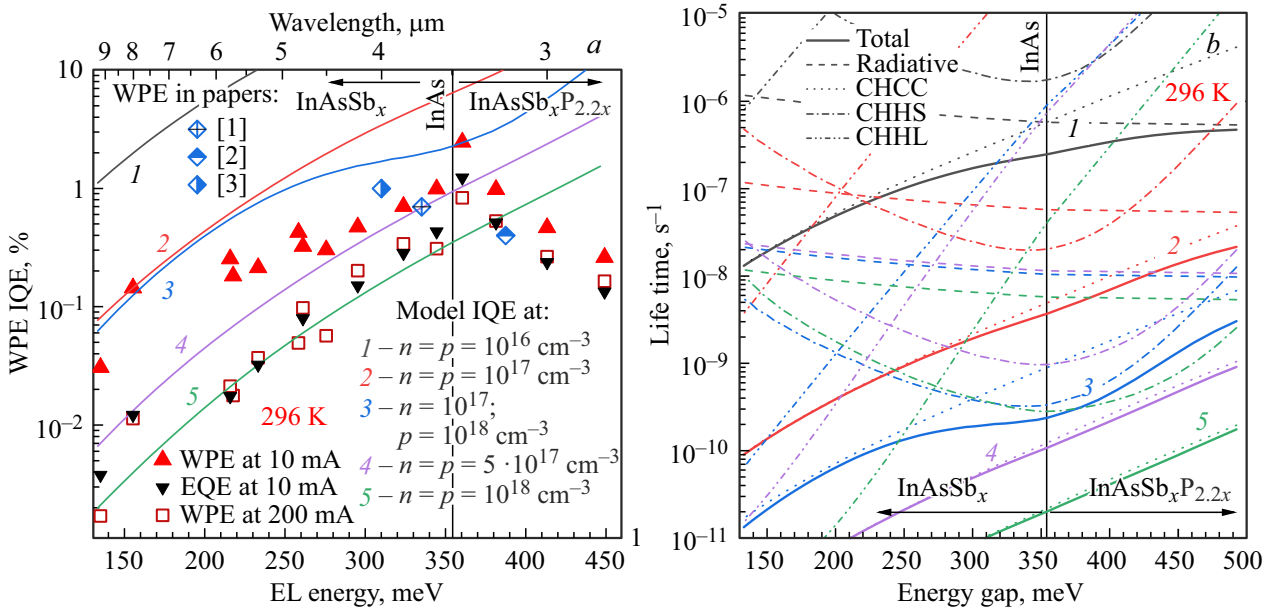


Рис. 4. Зависимости кпд (WPE) при токе накачки 10 и 200 мА, EQE при токе накачки 10 мА и расчетных значений внутренней квантовой эффективности от энергии в максимуме излучения (a) и расчетные значения времен жизни для излучательной и оже-рекомбинаций (b) при комнатной температуре при различных уровнях инжекции (указанных на фрагменте a).

соответствующих или близких к ширине запрещенной зоны InAs, а падающее на гетероструктуре напряжение демонстрирует монотонную зависимость от энергии максимума спектра.

Данные результаты были использованы для расчета кпд (англ. wall plug efficiency — WPE) СД от энергии фотона при токах накачки 10 и 200 мА, представленного на рис. 4, a. WPE аналогично мощности ЭЛ имеет максимум в области энергий, соответствующих InAs, при этом максимальное значение WPE = 2 % при токе инжекции 10 мА было получено в светодиодах на основе InAs с длиной волны в максимуме спектра ЭЛ 3.4 мкм (22 °C), что является наилучшим значением для средневолновых светодиодов. С увеличением длины волны в максимуме излучения светодиода имеет место экспоненциальное уменьшение эффективности, минимальная полученная

величина которой составила $\mathrm{WPE} = 0.2\,\%$ ($\lambda = 8$ мкм). Для анализа полученных зависимостей была произведена оценка квантовой эффективности люминесценции из отношения времен жизни $\mathrm{IQE} \sim \tau_{\mathrm{tot}}/\tau_{\mathrm{rad}}$, где τ_{rad} и τ_{tot} — радиационное и полное времена жизни неосновных носителей, соответственно. WPE, EQE и IQE связаны следующим образом:

$$\mathrm{WPE} = \frac{P_{\mathrm{opt}}}{I \cdot V}; \quad \mathrm{IQE} = \frac{P_{\mathrm{opt}}/E_{\mathrm{ph}}}{I/q};$$

$$\mathrm{WPE} = \mathrm{EQE} \cdot \frac{E_{\mathrm{ph}}[\text{эВ}]}{V}; \quad \mathrm{EQE} = \mathrm{IQE} \cdot \gamma, \qquad (2)$$

где EQE — внешняя квантовая эффективность, γ — коэффициент вывода излучения. При этом τ_{tot} определяется скоростью протекания трех основных каналов рекомбинации: Шокли–Рида–Холла (ШРХ, англ. — SRH) по внутризонным состояниям, создаваемым дефектами и примесями; радиационной с испусканием фотона; оже-рекомбинации, т. е. передачи энергии рекомбинации несвязанному заряду (НЗ) третьей частице через кулоновское взаимодействие.

На рис. 4, *a* представлены численные оценки внутренней квантовой эффективности IQE ($\eta \sim \tau_{\mathrm{tot}}/\tau_{\mathrm{rad}}$) в зависимости от ширины запрещенной зоны активной области при комнатной температуре для различных соотношений полных концентраций носителей заряда $n = n_0 + \Delta n$ и $p = p_0 + \Delta p$. На рис. 4, *b* представлены расчеты времен жизни: радиационного, трех оже-процессов и полного для выбранных концентраций. Вертикальная разделительная линия при энергии 350 мэВ соответствует ширине запрещенной зоны активной области из InAs. В сторону меньших энергий расчет производился для твердого раствора InAsSb_x, в сторону бóльших — для $\mathrm{InAs}_{1-x-y}\mathrm{Sb}_x\mathrm{P}_y$, изопериодного с InAs ($y \approx 2.2x$).

Расчеты времен жизни были выполнены без учета рекомбинации ШРХ, так как она не является фундаментальным ограничением, поскольку определяется технологическим качеством получаемых материалов. Радиационное время жизни рассчитывалось в соответствии с выражением (25) из работы [6]. Время жизни, определяемое оже-рекомбинацией по трем основным каналам, а именно CHCC (рекомбинация с переходом электрона „вверх“ по зоне проводимости), CHHS (рекомбинация с переходом тяжелой дырки в спин-отщепленную подзону) и CHHL (рекомбинация с переходом тяжелой дырки в подзону легких дырок), рассчитывалось в согласии с результатами работы [7]. „Суммарное“ время жизни рассчитывалось, как инвертированная сумма обратных величин:

$$\tau_{\mathrm{tot}} = \left(\frac{1}{\tau_{\mathrm{tot}}} + \frac{1}{\tau_{\mathrm{CHCC}}} + \frac{1}{\tau_{\mathrm{CHHS}}} + \frac{1}{\tau_{\mathrm{CHHL}}} \right). \qquad (3)$$

Почти все представленные кривые рассчитывались для высокого уровня инжекции, когда $n = p$. Однако синяя кривая (*3*) рассчитана для случая $n < p$, т. е. люминесценции из p^+-слоя, и демонстрирует нам характерные особенности люминесценции InAs и его твердых растворов: провал квантовой эффективности в области InAs и близких растворов ($0.15(\mathrm{InAsSb}) \leq x \leq 0.1(\mathrm{InAsSbP})$) из-за резонансного характера оже-процесса CHHS; почти полное слияние с красной кривой (*2*) в области более узкозонных составов вследствие того, что оже-процесс CHHL не эффективен в полупроводниках с близкими значениями ширины запрещенной зоны E_g и спин-орбитального отщепления Δ_{SO}. При этом, при высоком уровне инжекции данные особенности становятся незаметными из-за доминирования CHCC оже-процесса.

Как видно из рис. 4, *a*, с одной стороны, ни одна из расчетных кривых не описывает экспериментальные результаты с высокой точностью. С другой стороны, полученные расчетные зависимости хорошо описывают ход экспериментальных значений WPE при токе 200 мА для активных областей из InAsSb_x. При этом ход зависимости WPE при 10 мА при уменьшении энергии оказывается менее резким, но значения EQE для 10 мА, полученные из них по формуле (2), хорошо согласуются с оценкой. Также и абсолютные значения WPE и IQE для случая высокого уровня инжекции ($n = p = 10^{17}$ см$^{-3}$) для активной области из InAs достаточно близки, что свидетельствует о довольно высоком коэффициенте вывода излучения из активной области СД. При анализе точек WPE СД с активной областью из $\mathrm{InAsSb}_y\mathrm{P}_x$ в области „изопериодных“ составов ($x \approx 2.2y$) при $x \leq 0.075$ видно, что теоретическая IQE больше экспериментальных значений и растет вслед увеличению ширины запрещенной зоны в отличие от полученных WPE. По итогу анализа данного графика можно сформулировать следующие выводы:

– менее резкое падение WPE при 10 мА при уменьшении энергии в максимуме спектра является следствием того, что рабочее напряжение при малых токах накачки оказывается меньше энергии запрещенной зоны, т. е. отношение в (2) $\frac{E_{\mathrm{ph}}[\text{эВ}]}{V} > 1$;

– для твердого раствора InAsSb доминирующим является CHCC процесс, приводящий к уменьшению квантовой эффективности вслед уменьшению ширины запрещенной зоны состава;

– снижение экспериментальных WPE электролюминесценции p–n-структур на основе InAsSbP при движении в коротковолновую (высокоэнергетичную) область, скорее всего связано с увеличением доли излучения, поглощенного в подложке n^+-InAs, а также с уменьшением высоты барьеров на гетерограницах активной области и широкозонных слоев и, как следствие, падением эффективности электрического ограничения инжектированных носителей заряда.

Тем не менее сравнение полученных экспериментальных значений WPE при комнатной температуре с результатами работ зарубежных коллективов: ICLED, $\mathrm{WPE} = 0.7\,\%$ ($\lambda = 3.7$ мкм) [1]; RC-T2SL-LED, $\mathrm{WPE} = 0.4\,\%$ ($\lambda = 3.2$ мкм) [2];

RCICLED, WPE = 1 % ($\lambda = 4.0$ мкм) [3] — показывает, что СД на основе двойных гетероструктур InAsSbP/InAs(Sb,P)/InAsSbP демонстрируют сравнимые или более высокие значения при заметно более простой технологии эпитаксиального роста.

3. Заключение

Были проведены исследования и анализ фото- и электролюминесценции $p-n$-гетероструктур с активными областями на основе InAs и твердых растворов InAsSb и InAsSbP в области составов, обеспечивающих значения ширины запрещенной зоны активной области $E_g = 110-480$ мэВ при комнатной температуре. Было продемонстрировано достижение значения WPE = 2 % при токе инжекции 10 мА в светодиодах с длиной волны в максимуме 3.4 мкм (22 °C). Таким образом, показано, что использование $p-n$-гетероструктур на основе твердых растворов арсенида индия является эффективным подходом для создания средневолновых светодиодов, характеризующихся относительной простотой эпитаксиального роста, низкими рабочими напряжениями и высокой эффективностью преобразования энергии по сравнению со светодиодами на основе каскадных квантово-размерных структур.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] N. Schäfer, J. Scheuermann, R. Weih, J. Koeth, S. Höfling. Opt. Eng., **58** (11), 117106 (2019). ttps://doi.org/10.1117/1.OE.58.11.117106
[2] K.N. Schrock, D.A. Montealegre, W. Dai, M.Z. Bellus, L.M. Nichols, J.P. Prineas. J. Appl. Phys., **135** (18), 183101 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0193624
[3] D.A. Montealegre, K.N. Schrock, A.C. Walhof, A.M. Muellerleile, J.P. Prineas. Appl. Phys. Lett., **118** (7), 071105 (2021). https://doi.org/10.1063/5.0039269
[4] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys., **89** (11), 5815 (2001). https://doi.org/10.1063/1.1368156
[5] A. Krier. Appl. Phys. Lett., **56** (24), 2428 (1990). https://doi.org/10.1063/1.102899
[6] Н.Л. Баженов, К.Д. Мынбаев, Г.Г. Зегря. ФТП, **49** (9), 1184 (2015).
[7] Н.Л. Баженов, К.Д. Мынбаев, А.А. Семакова, Г.Г. Зегря. ФТП, **53** (4), 435 (2019) DOI: 10.21883/FTP.2019.04.47437.9004

Редактор Г.А. Оганесян

Luminescence of $p-n$ heterostructures based on InAs, InAsSb, and InAsSbP

A.A. Klimov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, R.E. Kunkov, T.S. Lukhmyrina, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, A.A. Usikova

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The study presents the results of photoluminescence and electroluminescence investigations of $p-n$ heterostructures with active regions based on InAs and the solid solutions InAsSb and InAsSbP, with compositions yielding band gaps of 110–480 meV at room temperature. Wall-plug efficiency data are presented and compared with calculated values of the internal quantum efficiency accounting for Auger recombination. A wall-plug efficiency of 2 % is achieved at an injection current of 10 mA in light-emitting diodes emitting at a wavelength of 3.4 μm at 22 °C. Possible reasons for the decrease in quantum efficiency associated with Auger-1 recombination in narrow-gap InAsSb solid solutions are discussed.