

06.2;12

Светодиоды на основе твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, выращенных из содержащих свинец растворов-расплавов

© Я.А. Пархоменко, А.П. Астахова, Е.А. Гребенщикова,
Э.В. Иванов, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: www.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 февраля 2004 г.

Созданы и исследованы светодиоды с максимумом длины волны излучения $\lambda = 2.3 \mu\text{m}$ и $\lambda = 2.44 \mu\text{m}$, в активной области которых использовались выращенные из свинцовых растворов-расплавов твердые растворы $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($x = 0.21; 0.25$). Внешний квантовый выход данных светодиодов составлял при комнатной температуре 1.6 и 0.11% соответственно.

Введение. В последние годы возрастает интерес к созданию и исследованию полупроводниковых оптоэлектронных приборов для средней инфракрасной (ИК) области спектра ($2-5 \mu\text{m}$), интересной с точки зрения мониторинга окружающей среды, а также медицинских применений. Наиболее перспективными материалами как для источников, так и для приемников излучения в диапазоне $1.8-3.0 \mu\text{m}$ являются многокомпонентные твердые растворы $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ на основе антимонида галлия (GaSb). Использование таких твердых растворов позволяет изменять ширину запрещенной зоны материала и, следовательно, рабочую длину волны прибора при сохранении периода решетки. В настоящее время увеличение рабочей длины волны оптоэлектронных приборов на

основе твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ остается наиболее важной задачей.

Ранее сообщалось о возможности существенного снижения концентрации комплексов природных дефектов $V_{\text{Ga}}\text{GaSb}$ в эпитаксиальных слоях твердых растворов GaSb и InAs, выращенных из содержащих свинец растворов-расплавов [1,2]. При этом свинец не образует соединений ни с какими компонентами расплава и не включается в твердую фазу. В работах [3,4] нами представлены результаты исследования роли свинца при выращивании твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$. Изучение гальваномагнитных свойств нелегированных, а также легированных теллуром и германием твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, выращенных из свинцовых растворов-расплавов, показало их перспективность для создания оптоэлектронных приборов для спектрального диапазона $1.8\text{--}3\ \mu\text{m}$. В данной работе впервые сообщается о создании светодиодов с максимумом длины волны излучения $\lambda = 2.3\ \mu\text{m}$ и $\lambda = 2.44\ \mu\text{m}$, созданных на основе твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, выращенных из свинцовых растворов-расплавов. Приводятся результаты исследования спектров электролюминесценции данных светодиодов.

Методика создания и исследования светодиодных структур.

Светодиодные гетероструктуры создавались методом жидкофазной эпитаксии на подложках GaSb(100) *n*- и *p*-типа проводимости. В качестве широкозонного эмиттера использовался эпитаксиальный слой GaSb толщиной $2.5\ \mu\text{m}$. Все слои были согласованы по периоду решетки с подложкой GaSb ($\Delta a/a < 1.0 \cdot 10^{-3}$). Расчет равновесных значений мольных долей компонентов в жидкой и твердой фазах для системы Pb–InAs–InSb–GaAs–GaSb при заданных температуре (560°C) и переохлаждении ($\Delta T = 3\ \text{K}$) производился по методу ИФЛКП [5,6].

Светодиоды на основе $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ создавались методом стандартной фотолитографии. Со стороны широкозонного слоя GaSb были сформированы меза- $\varnothing 300\ \mu\text{m}$ и точечный контакт $\varnothing 100\ \mu\text{m}$, со стороны подложки GaSb — сплошной контакт (рис. 1, *a*). В качестве контактов к материалам *n*- и *p*-типа использовались Cr/Au + Te/Au и Cr/Au + Ge/Au соответственно. Чипы размером $500 \times 500\ \mu\text{m}$ монтировались на стандартных корпусах TO-18. Спектральные характеристики светодиодов исследовались с помощью автоматизированной установки на основе монохроматора DK-480 (CVI Laser Corp., USA) и фотодиода InSb (Judson Technologies), охлаждаемого жидким азотом. Обработка сигнала фотоприемника осуществлялась по схеме синхронного детектирования

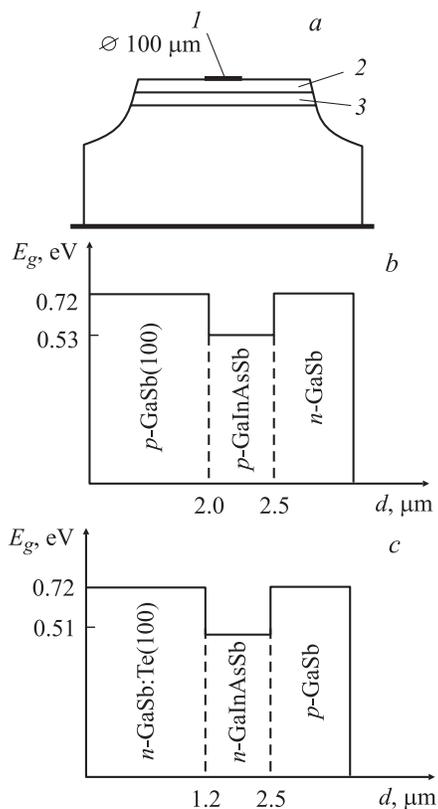


Рис. 1. Светодиодная меза-структура (а): 1 — верхний контакт, 2 — эмиттер, 3 — активная зона; и энергетические схемы GaSb/Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/GaSb светодиодных структур с содержанием индия в активной области $x = 0.21$ (b) и $x = 0.25$ (c).

с помощью селективного усилителя SR 810 (SRS Inc., USA). Спектральные характеристики диодов изучались при температуре $T = 300$ К при питании импульсным током со скважностью $Q = 2$ (меандр) и частотой 512 Hz.

Светодиоды с максимумом длины волны излучения $\lambda = 2.3 \mu\text{m}$. В активной области данных светодиодов использовался твердый раствор Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y} с содержанием индия в твердой фазе $x = 0.21$ ($E_g = 0.53$ eV, $T = 300$ К), толщиной $2 \mu\text{m}$, выращенный на подложке

GaSb(100). На рис. 1, *b* представлена энергетическая схема исследованной гетероструктуры. Спектры наиболее интенсивных сигналов излучательной рекомбинации были получены для светодиодов, в которых активная область не легировалась. При этом концентрация носителей, определенная из эффекта Холла, составляла $p = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ при $T = 300 \text{ K}$ ($p = 4.6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ при $T = 77 \text{ K}$), верхний слой GaSb легировался теллуром до концентрации $n \sim (1 \div 4) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ($T = 300 \text{ K}$).

Изучение вольт-амперных характеристик (ВАХ) светодиодов показало, что во всех случаях ВАХ имела диодный характер с напряжением отсечки 0.35 V при комнатной температуре. Последовательное сопротивление при прямом смещении составляло $\sim 3.1 \Omega$. Спектральные характеристики диода при $T = 300 \text{ K}$ представлены на рис. 2, *a*. Как видно из рисунка, спектры электролюминесценции светодиода состоят из одиночной полосы с максимумом $\lambda = 2.29 \mu\text{m}$ ($E_g = 0.54 \text{ eV}$) при токе 100 mA . Ширина спектра излучения на полувысоте (FWHM) при этом составляет $0.20 \mu\text{m}$ и увеличивается с ростом тока, достигая $0.23 \mu\text{m}$ при $I = 220 \text{ mA}$. Максимум спектра излучения при увеличении тока слабо смещается в длинноволновую область. При токе 220 mA указанный сдвиг составляет $0.02 \mu\text{m}$. Эти данные говорят о незначительном влиянии разогрева структуры на электролюминесцентные характеристики при протекании через нее питающего тока. Данный вывод также подтверждается отсутствием выраженного участка насыщения на зависимости интегральной оптической мощности от тока (см. вставку на рис. 2, *a*) вплоть до 220 mA . При этом мощность составляет 0.937 mW , квантовый выход (η) — 1.6% .

Светодиоды с максимумом длины волны излучения $\lambda = 2.44 \mu\text{m}$.

В активной области данных светодиодов использовался твердый раствор $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ с содержанием индия $x = 0.247$ ($E_g = 0.51 \text{ eV}$, $T = 300 \text{ K}$), толщиной $1.2 \mu\text{m}$, выращенный на подложке GaSb(100). На рис. 1, *c* представлена энергетическая схема данной гетероструктуры. Спектры наиболее интенсивных сигналов излучательной рекомбинации были получены для светодиодов, в которых активная область легировалась теллуром до концентрации $n = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ($T = 300 \text{ K}$), в качестве широкозонного эмиттера использовался легированный германием до концентрации носителей $p \sim 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ($T = 300 \text{ K}$) эпитаксиальный слой GaSb.

Вольт-амперная характеристика светодиода имела диодный характер с напряжением отсечки 0.4 V (при $T = 300 \text{ K}$). Последовательное сопротивление при прямом смещении составляло 1.7Ω .

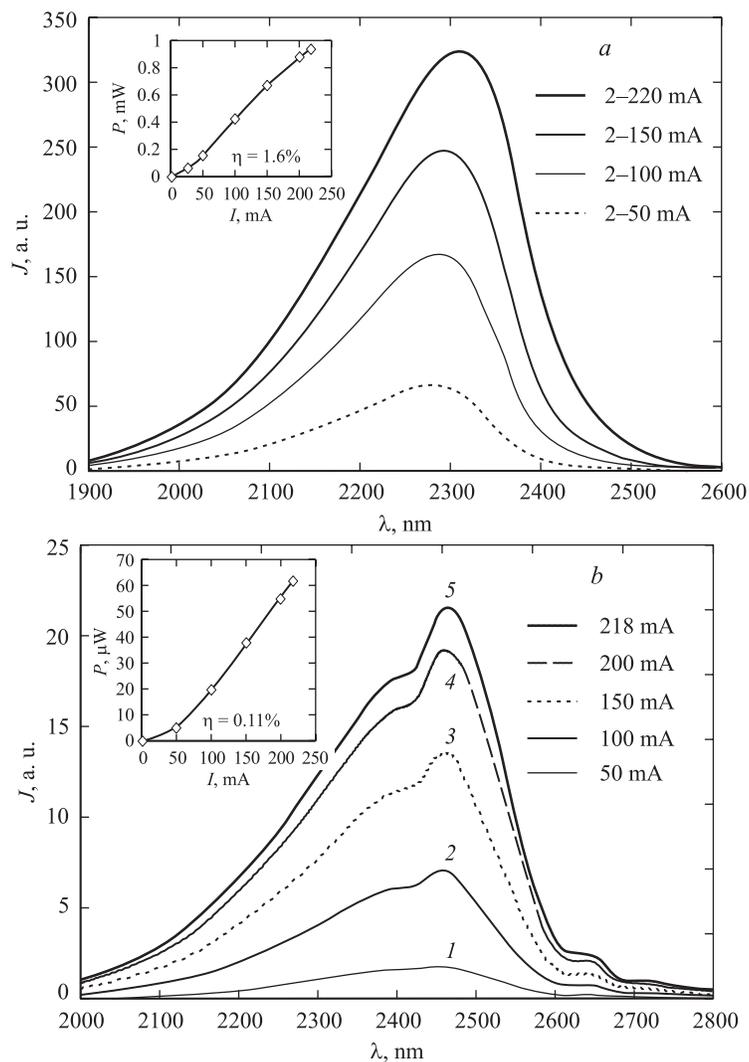


Рис. 2. Спектры электролюминесценции и зависимость интегральной оптической мощности от тока при $T = 300$ К светодиодов с содержанием индия в активной области $x = 0.21$ (a) и $x = 0.25$ (b). 1 — $I = 50$, 2 — 100, 3 — 150, 4 — 200, 5 — 218 мА.

Спектральные характеристики светодиода при $T = 300$ К приведены на рис. 2, *b*. Как видно из рисунка, спектр электролюминесценции имеет максимум при $\lambda \sim 2.44 \mu\text{m}$, положение которого соответствует энергии ширины запрещенной зоны материала активной области ($E_g = 0.51$ eV). FWHM спектра при токе 100 мА составляет $\sim 0.26 \mu\text{m}$. Спектральный максимум излучения светодиода не сдвигается при изменении тока от 50 до 200 мА, FWHM при этом тоже не меняется, что говорит об отсутствии влияния нагрева структуры питающим током. На спектре электролюминесценции светодиода наблюдается провал при $\lambda \sim 2.42 \mu\text{m}$ (рис. 2, *b*), связанный с особенностями спектральной характеристики используемой дифракционной решетки (300 штрихов/мм). Кроме того, в области длин волн 2.6–2.72 μm проявляются интенсивные линии поглощения воды и углекислого газа.

Зависимость интегральной оптической мощности светодиода от тока приведена на вставке рис. 2, *b*. Мощность составляет 61.6 μW при токе $I = 218$ мА, при этом внешний квантовый выход при комнатной температуре равен $\sim 0.11\%$.

Заключение. Таким образом, впервые на основе твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, выращенных из содержащих свинец растворов-расплавов, были созданы светодиоды с максимумом длины волны излучения $\lambda = 2.3 \mu\text{m}$ и $\lambda = 2.44 \mu\text{m}$. Квантовый выход при комнатной температуре составлял 1.6 и 0.11% соответственно. Данные светодиоды смогут найти широкое применение в системах экологического мониторинга и медицинской диагностики.

Список литературы

- [1] Баранов А.Н., Воронина Т.И., Лагунова Т.С. и др. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 5. С. 780–786.
- [2] Гребенюк А.М., Литвак А.М., Чарыков Н.А. и др. // ЖНХ. 1990. Т. 35. В. 11. С. 2941–2944.
- [3] Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Куницына Е.В., Пархоменко Я.А. и др. // ФТП. 2001. Т. 35. В. 8. С. 941–947.
- [4] Воронина Т.И., Лагунова Т.С., Куницына Е.В., Пархоменко Я.А. и др. // ФТП. 2002. Т. 36. В. 8. С. 917–924.
- [5] Литвак А.М., Чарыков А.Н. // ЖФХ. 1990. Т. 64. В. 9. С. 2331–2337.
- [6] Charykov N.A., Sherstnev V.V., Krier A. // J. of Cryst. Growth. 2002. V. 234. P. 762–772.