

06.2

Повышение эффективности светодиодов на основе твердых растворов GaInAsSb при пониженном содержании мышьяка в активной области

© Б.Е. Журтанов, Т.Н. Данилова, А.Н. Именков,
М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 22 ноября 2004 г.

Созданы светодиодные структуры на подложках GaSb с составом активной области $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ вблизи границы несмешиваемости ($x = 0.24$) с пониженным содержанием As ($y = 0.16$) относительно изопериодного состава. Обнаружена большая плотность дислокаций несоответствия. Тем не менее внешний квантовый выход излучения имеет рекордное значение 1.2% при комнатной температуре для спектральной полосы с длиной волны в максимуме $2.42\ \mu\text{m}$. Максимальная импульсная мощность излучения достигает 3.3 mW при токе 600 mA. Преобладает межзонное излучение, что говорит о высокой степени стехиометрии активной области.

1. Введение. Известно, что твердые растворы $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, изопериодные с GaSb ($y = 0.91x$), имеют область несмешиваемости в интервале реальных значений x от 0.25 до 0.75 [1–3]. Уменьшение содержания As приближает их к твердому раствору $\text{Ga}_{1-z}\text{In}_z\text{Sb}$ [1–3], у которого отсутствует область несмешиваемости, и тем самым сужает область несмешиваемости твердого раствора. Это должно позволить получать методом жидкофазной эпитаксии слои твердых растворов с ранее недоступными значениями ширины запрещенной зоны от 0.48 до 0.24 eV, соответствующими области несмешиваемости. Очень важно, что при уменьшении содержания As увеличивается спин-орбитальное расщепление валентной зоны и оно становится больше ширины запрещенной зоны. Безызлучательная оже-рекомбинация СННС, состоящая в переходе одной дырки в зону проводимости, а второй в спин-отщепленную подзону валентной зоны, становится маловероятной. Внутренний квантовый выход излучения в результате должен увели-

читься. Однако при уменьшении содержания As возрастает постоянная кристаллической решетки, что приводит к механическому сжатию выращиваемого слоя. Ширина запрещенной зоны почти не зависит от содержания As. Конечно, чем меньше As в слое, тем сильнее слой сжат. В нем возможно возникновение дефектов несоответствия постоянных решетки слоя и подложки GaSb. Свойства такого слоя еще следует изучить. Можно ожидать, что метод выращивания слоев $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ с пониженным содержанием As на подложках GaSb вместе с методом выращивания из растворов-расплавов, содержащих Pb [4], позволит проникнуть в область несмешиваемости. Причем слои будут обладать высокоэффективной электролюминесценцией.

В публикуемой работе ставилась цель создать светодиодные структуры на подложках GaSb с активной областью $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ с $x = 0.24$ и пониженным содержанием As ($y < 0.91x$) относительно изопериодного состава вблизи границы несмешиваемости и изучить электролюминесцентные свойства созданных структур.

2. Методика создания и исследования светодиодных структур.

Исследуемые светодиодные структуры (рис. 1) изготавливались методом жидкофазной эпитаксии на подложках *n*-GaSb толщиной $350 \mu\text{m}$, ориентированных по кристаллографической плоскости (111)В. Подложки были легированы Te до концентрации электронов $8 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$. Активный слой $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ толщиной $1.3 \mu\text{m}$ с $x = 0.24$ (рис. 1, а) выращивался методом охлаждения. Раствор-расплав содержал атомы выращиваемого твердого раствора Ga, In, Sb, As и легирующую примесь Te. Содержание атомов As было на 25% меньше, чем требуется для роста изопериодного с GaSb слоя. Содержание атомов Te обеспечивало концентрацию электронов в слое $1 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$. Измеренное рассогласование постоянных кристаллической решетки слоя и подложки получилось 0.26%, что меньше ожидаемого (0.36%). Далее выращивался эмиттерный слой *p*-GaSb толщиной $3.5 \mu\text{m}$, легированный Ge до концентрации дырок $1 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$. На него наращивался контактный слой *p*-GaSb толщиной $0.5 \mu\text{m}$, сильно легированный Ge до концентрации дырок $8 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$. Исследованы два варианта конструкций светодиодов: в первом варианте пластина разделялась на светодиодные чипы площадью $350 \times 350 \mu\text{m}^2$, затем чип припаивался эпитаксиальным слоем к кристаллодержателю ТО-18, имеющему лунку (рис. 1, б); во втором варианте площадь чипа была $500 \times 500 \mu\text{m}^2$, и он припаивался подложечной частью к кристаллодержателю ТО-18 с плоским столиком

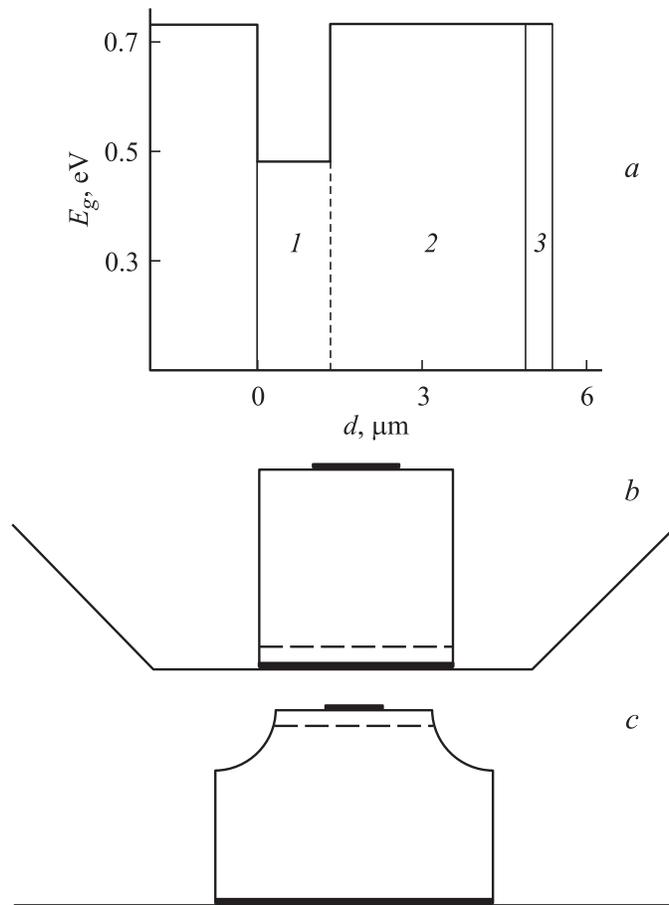


Рис. 1. Зависимость ширины запрещенной зоны E_g от толщины d светодиодной структуры с тремя эпитаксиальными слоями: 1 — активный, 2 — эмиттерный, 3 — контактный (a); схемы конструкции светодиодов: b — первый вариант, эпитаксиальный слой чипа припаян к кристаллодержателю ТО-18, имеющему лунку (светодиод 941 № 1), c — второй вариант, чип припаян подложечной частью к кристаллодержателю ТО-18 с плоским столиком (светодиод 941 № 3 РМ).

(рис. 1, с). В первом из этих вариантов на наружной стороне был сформирован омический контакт диаметром $150\ \mu\text{m}$, во втором варианте на наружной стороне была сформирована меза диаметром $300\ \mu\text{m}$ с омическим контактом диаметром $100\ \mu\text{m}$.

Спектры и диаграммы направленности излучения измерялись при комнатной температуре и различных прямых токах от 50 до 600 мА. Светодиоды питались импульсами тока длительностью 1 мс с заполнением 0.5 при токах $< 100\ \text{mA}$ и длительностью 200 ns с заполнением 0.02 при токах $> 100\ \text{mA}$. Светодиоды обдувались бытовым вентилятором для уменьшения нагревания. Спектры измерялись монохроматором МДР-2, прокалиброванным в единицах мощности излучения на единицу длины волны ($\text{mW}/\mu\text{m}$). Спектры измерялись в направлении, перпендикулярном активному слою. Для вычисления мощности излучения проводилось интегрирование по диаграмме направленности.

3. Экспериментальные результаты. Эпитаксиальная поверхность при пониженном содержании As необычная. Она содержит сеть углублений диаметром около $1\ \mu\text{m}$ с шагом порядка $10\ \mu\text{m}$. Такая сеть может быть образована дислокациями несоответствия постоянных кристаллических решеток, когда постоянная решетки эпитаксиального слоя больше, чем подложки. Возникающие нити дислокаций, по-видимому, сильно уменьшают механические напряжения сжатия, как это следует из планарности пластины.

Вольт-амперные характеристики исследуемых светодиодов имеют диодный характер. Напряжение отсечки в прямом направлении составляет 0.3 В, последовательное сопротивление около $3\ \Omega$ для обоих вариантов конструкций. Спектры излучения можно считать однополосными, хотя имеется малозаметная ступенька на длинноволновой стороне (рис. 2). Важно то, что эта ступенька малозаметная, ее можно считать обусловленной двухзарядными акцепторами, связанными с нестехиометрией [5,6]. Преобладающую спектральную полосу можно считать межзонной. Для сравнения отметим, что в GaSb, где нестехиометрия составляет (1–2)%, преобладает излучение через двухзарядные акцепторы, а межзонное излучение незаметно [5,6]. Малозаметность ступеньки говорит о высокой стехиометричности активной области. Длина волны в максимуме в первом варианте конструкции при малых токах ($< 100\ \text{mA}$) составляет $2.42\ \mu\text{m}$ (энергия фотона $h\nu = 0.51\ \text{eV}$), а во втором варианте $2.40\ \mu\text{m}$ ($h\nu = 0.52\ \text{eV}$). Ширина запрещенной зоны, определенная из спектров излучения, получается равной 0.49 eV. Ширина спектральной полосы на половине высоты в первом варианте $0.21\ \mu\text{m}$

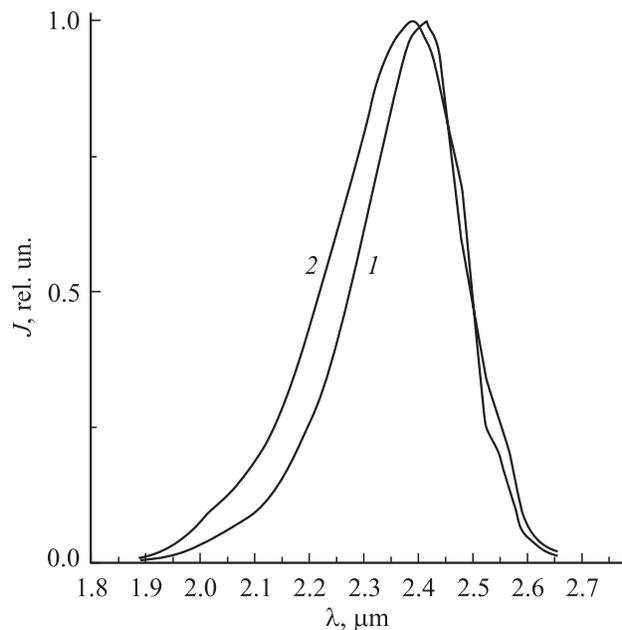


Рис. 2. Спектры излучения светодиодов при токе 50 мА для двух вариантов конструкций светодиодов: 1 — первого, 2 — второго.

($44 \text{ meV} = 1.7 \text{ kT}$), во втором варианте $0.26 \mu\text{m}$ ($57 \text{ meV} = 2.2 \text{ kT}$). Надо отметить, что длина волны в максимуме уменьшается с ростом тока из-за увеличения концентрации электронов. Это уменьшение составляет $0.04 \mu\text{m}$ для первого варианта и $0.07 \mu\text{m}$ для второго при увеличении тока от 50 до 600 мА. Приблизительно на столько же увеличивается ширина спектра. Таким образом, спектры излучения слегка различаются в разных вариантах конструкции светодиода, что коррелирует с различием в плотностях тока.

Диаграммы направленности первого варианта конструкции можно считать состоящей из косинусной части, соответствующей выходу излучения через лицевую наружную грань кристалла, и в 2 раза более узкой также косинусной части, соответствующей выходу излучения через боковые грани и отражению его от стенок лунки кристаллодержателя. Второй вариант конструкции дает почти ненаправленное излучение в

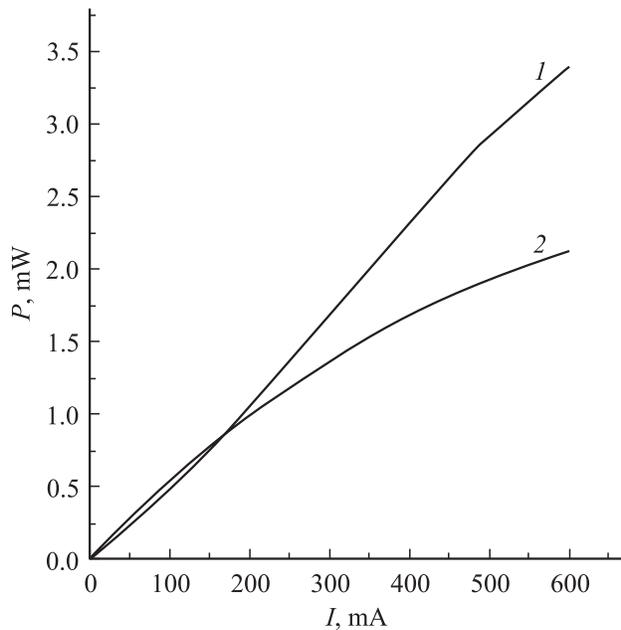


Рис. 3. Зависимость импульсной оптической мощности светодиодов от тока для двух вариантов конструкций: 1 — первого, 2 — второго.

пределах полупространства, как это характерно для глубокого травления мезаструктуры [5].

Импульсная мощность излучения светодиодов первого варианта конструкции почти линейно увеличивается с ростом тока (рис. 3, кривая 1) с небольшой сверхлинейностью при токах до 100 мА и небольшой сублинейностью при токах > 500 мА. Тогда как второй вариант дает сугубо сублинейную зависимость (рис. 3, кривая 2), что связано с сосредоточением инжекционного тока под контактом, наблюдавшимся у светодиодов подобной конструкции на другие длины волн [5,6,7] при плохом растекании тока по тонкой p -области. Плотность тока под контактом при сосредоточении тока сверхлинейно увеличивается с ростом тока, давая соответствующий рост уровня возбуждения полупроводника. Поэтому в светодиодах второго варианта конструкции длина волны в максимуме чуть меньше и ее уменьшение с током чуть больше,

чем в светодиодах первого варианта конструкции, в которой площади p -области и омического контакта к ней равны и инжекция равномерная. По той же причине в светодиодах второго варианта спектральная полоса шире, чем в светодиодах первого варианта. Анализ формы спектров излучения показывает, что у светодиодов первого варианта концентрация неравновесных носителей в области рекомбинации при токе 600 мА в 2 раза меньше, чем равновесных, а во втором варианте эти концентрации одинаковы, т.е. уровень возбуждения приближается к высокому. При высоком уровне возбуждения увеличивается вероятность безызлучательной рекомбинации СНСС, состоящей в переходе одного электрона из зоны проводимости в валентную зону с отдачей высвободившейся энергии второму электрону, остающемуся в зоне проводимости. Вероятность межзонной излучательной рекомбинации соответственно понижается. Наибольший дифференциальный квантовый выход излучения составляет 1.2% в обоих вариантах, но в первом варианте он имеет место в интервале токов 200–500 мА, тогда как во втором варианте в интервале токов 50–100 мА. В светодиодах первого варианта мощность излучения достигает 3.3 мВт при токе 600 мА, что в 1.5 раза больше, чем во втором варианте, благодаря равномерности инжекции по всей площади p - n -перехода. Полученный в публикуемой работе максимальный внешний квантовый выход излучения в 2 раза больше, чем в светодиодах с изопериодной к GaSb активной областью $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ при той же ее толщине [8]. По-видимому, уменьшение содержания As, относительно необходимого для изопериодности слоя, сужает область несмешиваемости. Активная область не оказывается в области несмешиваемости. Кристаллографическое совершенство и степень стехиометрии активной области повышаются. В результате повышения степени стехиометрии уменьшается концентрация двухзарядных акцепторов, и излучение через них ослабляется, а межзонное излучение усиливается. Ударная оже-рекомбинация СННС ослабляется из-за увеличения спин-орбитального расщепления валентной зоны с уменьшением содержания As. Скорость же оже-процесса СНСС почти не меняется в первом приближении. Повышение стехиометрии уменьшает концентрацию собственных двухзарядных центров, что позволяет легко добиться низкой концентрации основных носителей заряда и таким образом уменьшить скорость СНСС оже-процесса. В исследованных светодиодах основными носителями являются электроны. Их концентрация в исследованных светодиодах составляет $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что в 30 раз меньше, а квантовый выход излучения на порядок больше,

чем в работе [4], у светодиодов на $2.44\ \mu\text{m}$. Это показывает путь дальнейшего увеличения квантового выхода излучения.

4. Заключение. Методом жидкофазной эпитаксии созданы светодиоды на длине волны $2.42\ \mu\text{m}$, у которых в качестве подложки используется GaSb, а в качестве активной области эпитаксиальный слой $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}_{0.16}\text{Sb}_{0.84}$ с пониженным на 25% содержанием As по сравнению с необходимым для изопериодности кристаллических решеток слоя и подложки. В слое обнаружены дислокации несоответствия параметров кристаллической решетки слоя и подложки. Достигнута рекордная для длины волны $2.4\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ величина внешнего квантового выхода излучения 1.2% и максимальная мощность излучения 3.3 mW при комнатной температуре. Полученный внешний квантовый выход излучения больше в 2 раза, чем в светодиодах с активной областью, изопериодной с подложкой. Это показывает несущественность комбинации через имеющиеся дислокации несоответствия параметров кристаллической решетки.

Список литературы

- [1] *Маделунг О.* Физика полупроводниковых соединений III и V групп. М.: Мир, 1967.
- [2] *Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В.* Полупроводниковая электроника: Справочник. Киев: Наук. думка, 1975.
- [3] *Yurgaftan I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R.* // J. of Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 5815–5875.
- [4] *Астахова А.П., Гребеницкова Е.А., Иванов Э.В. и др.* // ФТП. 2004. Т. 38. В. 12. С. 1466–1472.
- [5] *Гребеницкова Е.А., Именков А.Н., Журтанов Б.Е. и др.* // ФТП. 2003. Т. 37. В. 12. С. 1465–1472.
- [6] *Гребеницкова Е.А., Именков А.Н., Журтанов Б.Е. и др.* // ФТП. 2004. Т. 38. В. 6. С. 745–752.
- [7] *Именков А.Н., Гребеницкова Е.А., Журтанов Б.Е. и др.* // ФТП. 2004. Т. 38. В. 11. С. 1399–1407.
- [8] *Андаспаева А.А., Баранов А.Н., Гребеницкова Е.А. и др.* // ФТП. 1989. Т. 23. В. 8. С. 373–377.