

Инфракрасные светодиоды на основе твердых растворов GaInAsSb, выращенных из содержащих свинец растворов–расплавов

© А.П. Астахова, Е.А. Гребенщикова, Э.В. Иванов, А.Н. Именков, Е.В. Куницына, Я.А. Пархоменко[¶], Ю.П. Яковлев

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

(Получена 21 апреля 2004 г. Принята к печати 28 апреля 2004 г.)

Сообщается о создании светодиодов на основе твердых растворов GaInAsSb, выращенных из содержащих свинец растворов–расплавов. Приведены результаты исследования электролюминесцентных характеристик и их зависимости от тока и температуры. Внешний квантовый выход фотонов составил при комнатной температуре 1.6 и 0.11% для светодиодов с длиной волны излучения $\lambda = 2.3$ и 2.44 мкм соответственно. Для светодиодов с длиной волны излучения $\lambda = 2.3$ мкм при комнатной температуре в квазинепрерывном режиме достигнута средняя мощность излучения $P = 0.94$ мВт, а в импульсном режиме пиковая мощность излучения составляла $P = 126$ мВт (при токе 3 А, длительности импульса 0.125 мкс и частоте 512 Гц).

1. Введение

Спектральный диапазон 1.8–4.0 мкм представляет значительный интерес для систем лазерной дальнометрии и локации [1], высокочастотной атмосферной беспроводной связи [2], а также для медицинских задач и экологического мониторинга [3,4]. Твердые растворы GaInAsSb на основе антимонида галлия (GaSb) широко используются в оптоэлектронных приборах для данного спектрального диапазона. В работе [4] сообщалось о создании на основе таких твердых растворов высокоэффективных светодиодов, полностью перекрывающих диапазон 1.6–2.4 мкм. В настоящее время увеличение рабочей длины волны светодиодов на основе твердых растворов GaInAsSb остается наиболее важной задачей.

В работах [5–7] нами представлены результаты исследования свойств твердых растворов GaInAsSb, выращенных из содержащих свинец растворов–расплавов. Использование свинца позволило получить при температуре $T = 560^\circ\text{C}$ изопериодные с подложкой GaSb(100) твердые растворы $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$: $x = 0.14–0.27$, $y = 0.12–0.22$ (ширина запрещенной зоны $E_g = 0.59–0.49$ эВ при $T = 300$ К). Для предельного состава с содержанием индия в твердой фазе $x = 0.27$ удалось получить толщину эпитаксиального слоя 1.5 мкм. Во всех образцах свинец методом количественного рентгеноспектрального микроанализа не обнаружен. Изучение гальваномагнитных свойств нелегированных [6], а также легированных теллуrom [7] и германием твердых растворов GaInAsSb, выращенных из свинцовых растворов–расплавов, показало их перспективность для создания оптоэлектронных приборов спектрального диапазона 1.8–3.0 мкм.

В данной работе сообщается о создании светодиодов LED2.3 и LED2.44 с длиной волны максимума спектра излучения $\lambda = 2.3$ и 2.44 мкм, созданных на основе твердых растворов GaInAsSb, выращенных из свинцовых растворов–расплавов.

2. Методика создания и исследования светодиодных гетероструктур

Светодиодные гетероструктуры выращивались методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложках GaSb(100) *n*- и *p*-типа проводимости. В качестве широкозонного эмиттера использовался эпитаксиальный слой GaSb толщиной 2.5 мкм. Энергетическая схема светодиодных гетероструктур представлена на рис. 1, *a*. 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 ($\Delta T = 3$ К) производился по методу ИФЛКП (избыточные функции — линейные комбинации химических потенциалов) [8,9]. В качестве компонентов шихты для эпи-

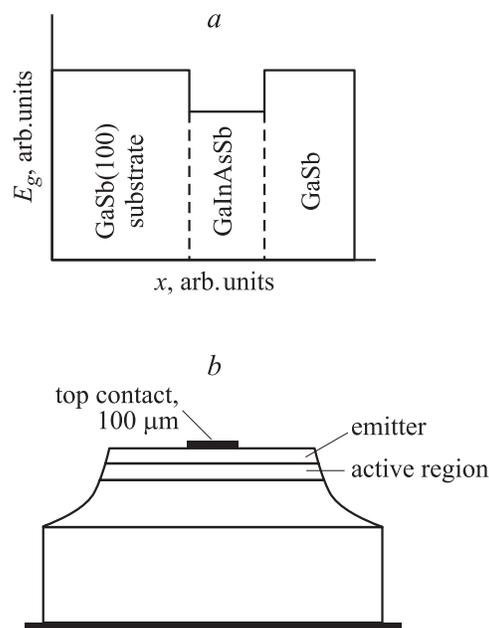


Рис. 1. *a* — энергетическая схема светодиодных структур. *b* — конструкция светодиода.

[¶] E-mail: parkhomen@mail.ioffe.ru

таксиальных слоев $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ использовались In чистотой 99.999 мас%, Sb чистотой 99.999 мас%, Pb чистотой 99.9999 мас%, а также бинарные соединения GaSb и InAs. Согласно данным рентгеновской дифрактометрии относительное рассогласование периодов кристаллических решеток слоя и подложки GaSb ($\Delta a/a$) не превышало $1.0 \cdot 10^{-3}$.

Светодиоды на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaSb создавались методом стандартной фотолитографии и представляли собой меза-структуры диаметром 300 мкм со сплошным контактом (рис. 1, b) со стороны подложки GaSb и точечным контактом диаметром 100 мкм со стороны широкозонного слоя GaSb. Омические контакты к материалам *n*- и *p*-типа проводимости формировались с помощью вакуумного напыления, при этом использовались Cr/Au+Te/Au и системы Cr/Au+Ge/Au соответственно. Чипы размером 500×500 мкм² монтировались на стандартных корпусах ТО-18.

Спектральные характеристики светодиодов исследовались с помощью автоматизированной установки на основе монохроматора DK-480 (CVI Laser Corp., USA) и InSb-фотодиода (Judson Technologies), охлаждаемого жидким азотом. Обработка сигнала фотоприемника осуществлялась по схеме синхронного детектирования с помощью селективного усилителя SR 810 (SRS Inc., USA). Измерения проводились при температурах $T = 300$ и 77 К при питании светодиодов импульсным током с разными длительностью и частотой следования импульсов.

Для исследования температурных зависимостей электролюминесцентных характеристик светодиодные чипы монтировались на термоохладитель Пельтье, расположенный на корпусе ТО-5.

Внешний квантовый выход излучения (η_{ext}) определялся из токовой зависимости оптической мощности излучения по формуле

$$\eta_{\text{ext}} = \lambda \frac{e}{hc} \frac{P}{I} 100\%, \quad (1)$$

где P — интегральная мощность излучения, I — ток, λ — длина волны, e — заряд электрона, h — постоянная Планка, c — скорость света.

Пространственное распределение интенсивности излучения светодиодов исследовалось при помощи установки, в которой образец вращался вокруг оси, лежащей в плоскости *p-n*-перехода. Диаграммы направленности снимались для двух направлений оси вращения: параллельно боковым противоположным граням чипа и под углом 45° к ним. Чипы монтировались на корпусах ТО-18 с плоским столиком. Измерения проводились при комнатной температуре при питании светодиода прямоугольными импульсами тока со скважностью $Q = 2$ и частотой следования $f = 523$ Гц. В качестве приемника использовалось неохлаждаемое PbSe-фотосопротивление с площадью фоточувствительной площадки 1×4 мм², расположенное на расстоянии 0.05 м от светодиода.

3. Светодиоды с длиной волны излучения $\lambda = 2.3$ мкм

В качестве активного слоя светодиодной структуры использовался твердый раствор $\text{Ga}_{0.79}\text{In}_{0.21}\text{As}_{0.16}\text{Sb}_{0.84}$ ($E_g = 0.534$ эВ при $T = 300$ К) толщиной 2 мкм. Наибольшая эффективность излучательной рекомбинации была получена для светодиодов, в которых активная область не легировалась и концентрация дырок, согласно данным, полученным по результатам измерений эффекта Холла, составляла $p = 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³ при $T = 300$ К ($p = 4.6 \cdot 10^{16}$ см⁻³ при $T = 77$ К). Эмиттерный слой GaSb легировался теллуром до концентрации электронов $n = (1-4) \cdot 10^{18}$ см⁻³ при $T = 300$ К.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) светодиодов при $T = 300$ К приведены на рис. 2. Напряжение отсечки для прямой ветви ВАХ составляет 0.4 В, а рассчитанное последовательное сопротивление 2.5 Ом.

Спектральные характеристики при $T = 300$ и 77 К, полученные при питании импульсным током со скважностью $Q = 2$ (меандр) и частотой $f = 512$ Гц, представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, при $T = 300$ К спектры излучения состоят из одиночной полосы с длиной волны, соответствующей максимуму интенсивности, $\lambda = 2.29$ мкм (энергия фотона $h\nu = 0.541$ эВ) при токе $I = 100$ мА. С увеличением тока до $I = 220$ мА максимум спектра излучения смещается в длинноволновую область на $\Delta\lambda = 0.02$ мкм. Ширина полосы излучения на половине высоты (FWHM) при этом изменяется от 0.20 до 0.23 мкм. Эти данные говорят о незначительном влиянии разогрева структуры на электролюминесцентные характеристики при протекании питающего тока.

При охлаждении до $T = 77$ К максимум спектра излучения смещается на $\Delta\lambda = 0.24$ мкм в коротковолновую сторону и длина волны составляет $\lambda = 2.05$ мкм ($h\nu = 0.605$ эВ), что соответствует ширине запрещенной зоны активной области $E_g(77 \text{ К}) = 0.608$ эВ. С увеличением тока от 50 до 200 мА положение максимума

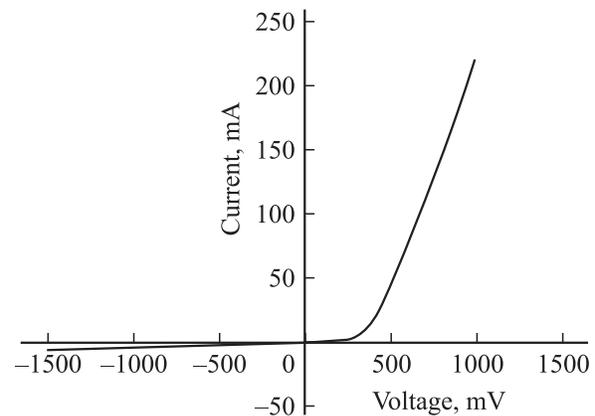


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика светодиода LED2.3 при $T = 300$ К, скважности $Q = 2$, частоте $f = 512$ Гц.

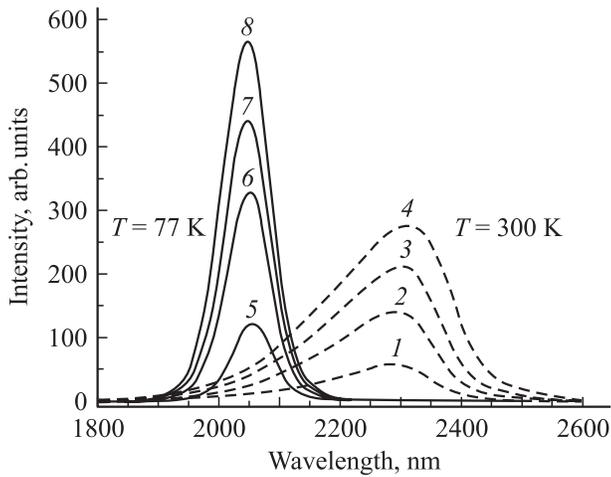


Рис. 3. Спектры электролюминесценции светодиодов LED2.3 (1–4) — $T = 300$ К, ток накачки, мА: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 150, 4 — 220. (5–8) — $T = 77$ К, ток накачки мА: 5 — 50, 60 — 100, 7 — 150, 8 — 200.

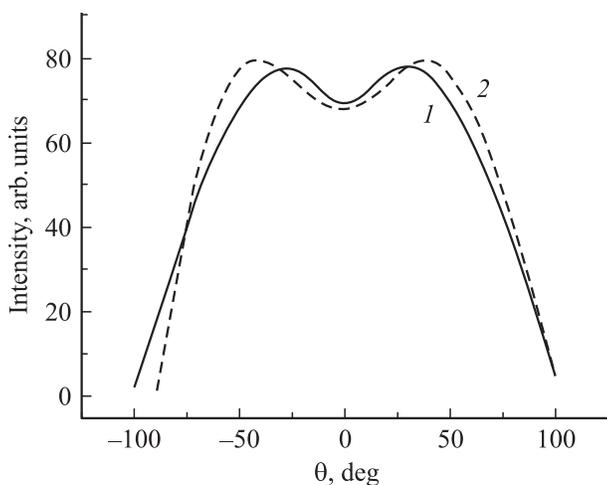


Рис. 4. Диаграмма направленности излучения светодиодов LED2.3 в плоскости, перпендикулярной плоскости p – n -перехода: 1 — плоскость параллельна боковым граням светодиода; 2 — плоскость содержит диагональ светодиодного чипа в плоскости p – n -перехода.

спектра не меняется. FWHM при токе 200 мА составляет 0.1 мкм.

Температурный коэффициент изменения длины волны максимума спектра составляет $\Delta\lambda/\Delta T = 1.5$ нм/К, что согласуется с температурным коэффициентом изменения ширины запрещенной зоны. Интенсивность излучения уменьшается в e раз при возрастании температуры на 110°C в интервале температур 0 – 120°C .

Как видно из диаграммы направленности излучения светодиода (рис. 4), интенсивность имеет максимумы при углах отклонения от нормали к плоскости лицевой наружной грани $\theta = \theta_{\max} = \pm 31^\circ$. При средних углах отклонения в плоскости, параллельной боковым граням, интенсивность излучения в максимумах меньше, чем в

плоскости, содержащей диагональ эпитаксиального слоя светодиодного чипа. При данной конструкции выход излучения из светодиода происходит как через лицевую грань, так и через боковые грани кристалла. Интенсивность излучения в центре диаграммы определяется главным образом выходом его через лицевую грань, перпендикулярно плоскости p – n -перехода; обозначим ее как P_{\perp} . При углах, отличных от нуля, к излучению через лицевую грань добавляется излучение через боковые грани. Когда ось вращения, лежащая в плоскости p – n -перехода, параллельна двум противоположным боковым граням, а двум другим перпендикулярна, добавляется излучение, выходящее только через одну боковую грань. Когда ось вращения направлена под углом 45° к боковым граням, добавляется излучение, выходящее из двух боковых граней. Поэтому в диагональном направлении интенсивность излучения больше. Анализ формы диаграммы направленности показывает, что распределение излучения через каждую грань близко к косинусоидальному, что позволяет определить эффективную интенсивность излучения перпендикулярно боковой грани: $P_{\parallel} = P_{\perp} \text{tg } \theta_{\max}$. Интенсивность излучения при угле отклонения от нормали к лицевой грани $\theta = 90^\circ$ меньше, чем P_{\parallel} , в основном из-за ограниченной площади корпуса, отражающей излучение. В результате того что через лицевую грань излучение выходит в полупространство, а через боковую только в четверть всего пространства, суммарная интенсивность P_{Σ} будет пропорциональна величине $(P_{\perp} + 2P_{\parallel})$. Рассматриваемые светодиоды, имея $\theta_{\max} = \pm 31^\circ$, излучают через четыре боковые грани на 20% больше, чем через лицевую грань.

На рис. 5 представлена зависимость интегральной оптической мощности светодиода от тока. В квазипрерывном режиме ($Q = 2$) (вставка к рис. 5) максимальная величина мощности $P = 0.94$ мВт получена

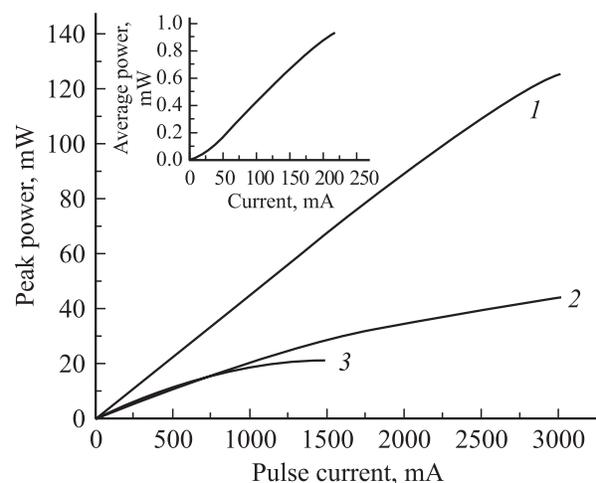


Рис. 5. Зависимость пиковой оптической мощности светодиода LED2.3 от тока при частоте $f = 512$ Гц и длительностях импульса τ , мкс: 1 — 0.125, 2 — 2, 3 — 32. На вставке — зависимость средней оптической мощности светодиода от тока при скважности $Q = 2$ и частоте $f = 512$ Гц.

при токе $I = 220$ мА. При токах $I < 50$ мА зависимость $P(I)$ носит сверхлинейный характер. В интервале токов 50–200 мА зависимость практически линейна, что говорит о незначительном разогреве активной области светодиодов током. Экстраполяция линейного участка зависимости $P(I)$ к нулевому значению мощности дает ток отсечки $I_{\text{cut}} = 20$ мА. При токах $I > 200$ мА измерения проводились в импульсном режиме с длительностями импульса $\tau = 0.125, 2, 32$ мкс. $P(I)$ имеет практически линейный характер до $I \approx 2.5$ А при $\tau = 0.125, 2$ мкс и до $I \approx 1$ А при $\tau = 32$ мкс. Затем зависимость переходит в сублинейную для всех τ . Как можно видеть, уменьшение длительности импульса приводит к продлению прямолинейного участка зависимости $P(I)$. Максимальная пиковая мощность излучения $P = 126$ мВт достигнута при $I = 3$ А, длительности импульса $\tau = 0.125$ мкс и частоте $f = 512$ Гц.

Внешний квантовый выход излучения исследованных светодиодов при комнатной температуре составляет $\eta_{\text{ext}} \approx 1.6\%$ при токе $I = 220$ мА. Дифференциальный внешний квантовый выход фотонов максимален при токе $I = 100$ мА и составляет $\eta_{\text{ed}} = 2\%$.

4. Светодиоды с длиной волны излучения $\lambda = 2.44$ мкм

В качестве активного слоя светодиодной структуры использовался твердый раствор $\text{Ga}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{As}_{0.22}\text{Sb}_{0.78}$ ($E_g = 0.506$ эВ при $T = 300$ К) толщиной 1.2 мкм, легированный Те до концентрации электронов $n = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В качестве широкозонного эмиттера использовался легированный Ge до концентрации дырок $p \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ эпитаксиальный слой GaSb.

Вольт-амперная характеристика светодиода, представленная на рис. 6, имеет диодный характер с напряжением отсечки 0.4 В (при $T = 300$ К) и последовательным сопротивлением 1.7 Ом при прямом смещении.

Спектральные характеристики излучения светодиода при питании импульсным током со скважностью $Q = 2$

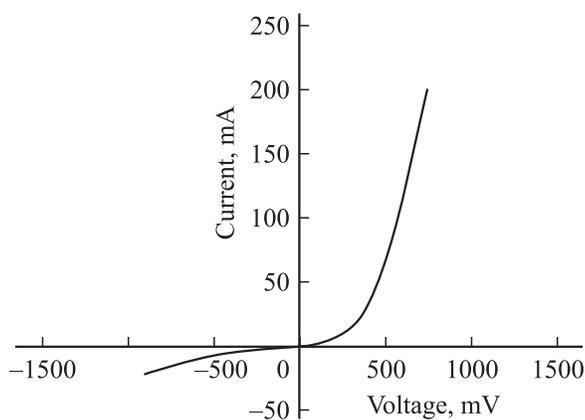


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика светодиода LED2.44 при $T = 300$ К, скважности $Q = 2$, частоте $f = 512$ Гц.

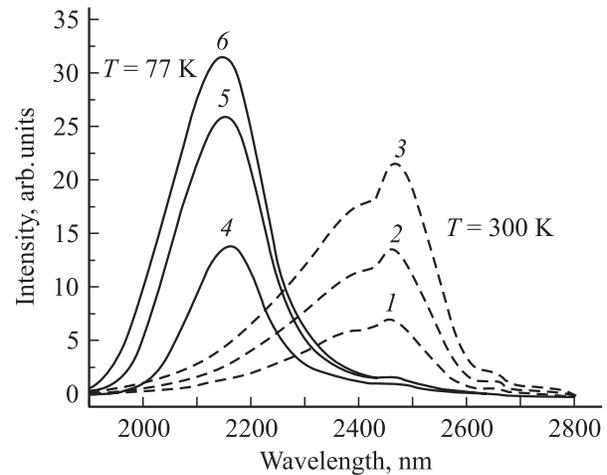


Рис. 7. Спектры электролюминесценции светодиодов LED2.44. (1–3) — $T = 300$ К, ток накачки, мА: 1 — 100, 2 — 150, 3 — 220. (4–6) — $T = 77$ К, ток накачки, мА: 4 — 100, 5 — 150, 6 — 200.

(меандр) и частотой следования $f = 512$ Гц при $T = 300$ и 77 К приведены на рис. 7. Как видно из рисунка, спектр электролюминесценции при $T = 300$ К имеет максимум на длине волны $\lambda = 2.44$ мкм, что соответствует $h\nu = 0.508$ эВ. Данная величина несколько больше расчетного значения ширины запрещенной зоны материала активной области $E_g = 0.506$ эВ. FWHM пика при токе $I = 100$ мА составляет ~ 0.26 мкм.

При изменении тока от 50 до 200 мА спектральный максимум излучения светодиода не меняет положения, при этом FWHM также остается неизменной, что говорит о незначительности нагрева структуры при протекании тока и малом уровне возбуждения. Наблюдаемый провал на спектре электролюминесценции светодиода при $\lambda \approx 2.42$ мкм связан с особенностями спектральной характеристики используемой дифракционной решетки (300 штрихов/мм). Кроме того, в области длин волн 2.60–2.72 мкм проявляются интенсивные линии поглощения воды и углекислого газа.

При $T = 77$ К длина волны максимума спектра излучения уменьшается с током: от $\lambda = 2.18$ мкм ($h\nu = 0.569$ эВ) при токе $I = 50$ мА до $\lambda = 2.14$ мкм ($h\nu = 0.579$ эВ) при токе $I = 200$ мА. FWHM спектральной полосы при этом увеличивается от ~ 0.14 до 0.20 мкм. Увеличение энергии фотонов максимума спектра электролюминесценции светодиода и расширение спектральной полосы говорит о получении высокого уровня возбуждения активной области при $T = 77$ К.

В импульсном режиме питания ($\tau = 2$ мкс, $f = 512$ Гц) при изменении тока от 0.5 до 3.0 А длина волны максимума полосы излучения уменьшается от $\lambda = 2.41$ мкм ($h\nu = 0.515$ эВ) до $\lambda = 2.39$ мкм ($h\nu = 0.519$ эВ). При этом FWHM спектральной полосы увеличивается от 0.28 до 0.36 мкм. Это объясняется большим уровнем возбуждения и при комнатной температуре.

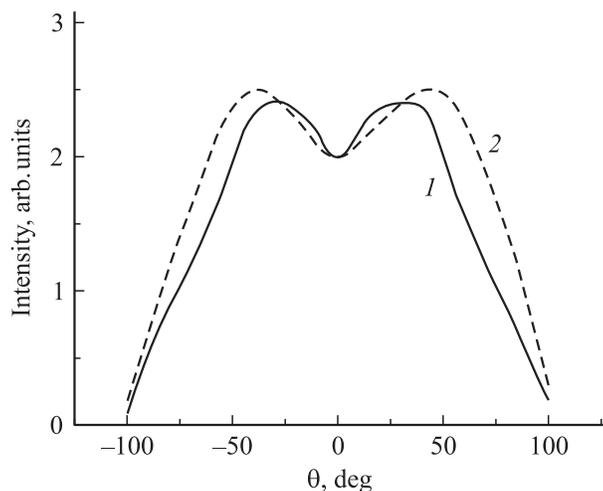


Рис. 8. Диаграмма направленности излучения светодиодов LED2.44 в плоскости, перпендикулярной плоскости p - n -перехода: 1 — плоскость параллельна боковым граням светодиода; 2 — плоскость содержит диагональ светодиодного чипа в плоскости p - n -перехода.

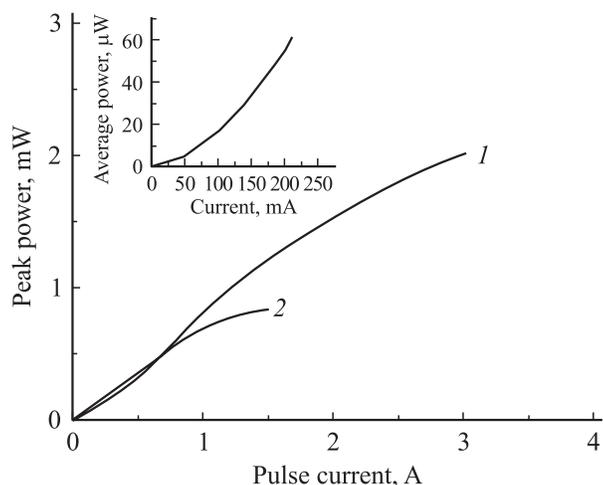


Рис. 9. Зависимость пиковой оптической мощности светодиода LED2.44 от тока при частоте $f = 512$ Гц и длительностях импульса τ , мкс: 1 — 2, 2 — 32. На вставке — зависимость оптической мощности светодиода от тока при скважности $Q = 2$ и частоте $f = 512$ Гц.

Диаграмма направленности данного светодиода представлена на рис. 8. Как видно, интенсивность излучения имеет небольшие максимумы при углах отклонения $\theta_{\max} = \pm 40^\circ$ в плоскости, параллельной двум противоположным боковым граням, и $\theta_{\max} = \pm 45^\circ$ в плоскости, расположенной под углом 45° к ним. Отношение интенсивностей излучения через четыре боковые грани и лицевую грань, определенное по углу максимума, составляет для первого случая $2 \operatorname{tg} \theta_{\max} = 2 \operatorname{tg} 40^\circ = 1.68$. Таким образом, через боковые грани выходит на 68% больше излучения, чем через лицевую грань.

В квазинепрерывном режиме ($Q = 2$) (вставка к рис. 9) токовая зависимость мощности излучения светодиода имеет сверхлинейный характер до $I = 50$ мА и далее до токов $I = 200$ мА возрастает линейно. В импульсном режиме (рис. 9) при $\tau = 2$ мкс зависимость $P(I)$ близка к линейной до токов $I \approx 1$ А, и в интервале токов 1–3 А зависимость носит слабый сублинейный характер. При длительностях импульса $\tau = 32$ мкс сублинейность ярко выражена, по-видимому, из-за нагревания активной области в течение времени импульса.

Максимальная величина средней оптической мощности составляет 62 мкВт при токе $I = 218$ мА, при этом внешний квантовый выход фотонов при комнатной температуре равен $\eta_{\text{ext}} \approx 0.11\%$. Дифференциальный внешний квантовый выход фотонов максимален при токе 600 мА и составляет $\eta_{\text{ed}} = 0.17\%$.

Максимальная пиковая мощность излучения в импульсном режиме $P = 2$ мВт была достигнута при токе $I = 3$ А, длительности импульса $\tau = 2$ мкс и частоте $f = 512$ Гц.

5. Обсуждение и анализ результатов

Спектры излучения светодиодов с длиной волны излучения 2.3 мкм проявляют основные признаки межзонной излучательной рекомбинации: небольшое ($\sim k_B T$) превышение энергии фотонов в максимуме над шириной запрещенной зоны узкозонного слоя; независимость от тока энергии максимума спектра при малых токах, соответствующих небольшому уровню возбуждения, в то же время слабое возрастание с током при больших токах, когда достигается большой уровень возбуждения; ширина спектральной полосы излучения $(1.5-2)k_B T$ и небольшое ее увеличение с током при больших уровнях возбуждения. Можно сделать вывод о том, что излучательная рекомбинация обусловлена инжекцией электронов в узкозонный p -слой и их рекомбинацией с дырками в этом слое за счет межзонных электронных переходов.

Сверхлинейность зависимости мощности излучения от тока при $I < 20$ мА, наиболее вероятно, связана с глубокими уровнями безызлучательной рекомбинации в узкозонном слое, которые имеются также и в слоях GaSb. При токах, больших тока отсечки ($I_{\text{cut}} = 20$ мА), уровни насыщаются и обусловленный ими ток остается ограниченным током отсечки. Омические утечки, оцененные по обратной ветви вольт-амперной характеристики, составляют на порядок меньшую величину.

Таким образом, при токах, больших тока отсечки, преобладающим механизмом рекомбинации является межзонная рекомбинация, причем, возможно, не только излучательная: дифференциальный внутренний квантовый выход фотонов в области больших токов равен квантовому выходу фотонов при межзонных переходах.

При оценке внутреннего квантового выхода будем исходить из того, что излучение генерируется в узкозонном слое, где существует вероятность переизлучения.

Объем узкозонного слоя составляет всего 0.28% объема структуры, а коэффициент нефотоактивного поглощения α_d в среднем $\sim 10 \text{ см}^{-1}$. Поэтому только фотоны с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны узкозонного материала на 45 мэВ и больше, в основном будут поглощаться на фотоактивных межзонных переходах. Доля этих коротковолновых фотонов составляет 1/4 от всех первоначально излучаемых. В исследуемых светодиодах имеются факторы, обуславливающие ненаправленность излучения — шероховатость поверхности подложки, ступеньки на боковой поверхности мезы, на которых излучение рассеивается при отражении. Поэтому в данном случае применима формула (4) из работы [10], которая связывает внешний квантовый выход фотонов η_{ext} с внутренним квантовым выходом длинноволновых фотонов η_l и коротковолновых фотонов η_s , а также с коэффициентами нефотоактивного поглощения α_d и эффективного поглощения, обусловленного выходом излучения из кристалла, α_e . Последний может быть найден по формуле (6) работы [10]:

$$\alpha_e = \frac{S}{Vn(n+1)^2},$$

где S — площадь свободной световыводящей поверхности, V — объем кристалла, n — показатель преломления.

Формулу для η_{ext} раскроем относительно η_l :

$$\eta_l = \left[k + \eta_{\text{ext}}^{-1} \left(1 + \frac{\alpha_d}{\alpha_e} \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где $k = \eta_s / \eta_l$.

В нашем случае $k = 1/3$, $\alpha_e = 1.48 \text{ см}^{-1}$, $\alpha_d = 10 \text{ см}^{-1}$.

При $\eta_{\text{ext}} = 1.6\%$ получаем $\eta_l = 12\%$, $\eta_s = 4\%$ и суммарный внутренний квантовый выход фотонов $\eta_{\text{int}} = \eta_l + \eta_s = 16\%$.

Для определения квантового выхода излучения в межзонной рекомбинации воспользуемся дифференциальным внешним квантовым выходом фотонов $\eta_{ed} = 2\%$ вместо η_{ext} . Тогда внутренний квантовый выход длинноволновых фотонов $\eta_{ld} = 15\%$, коротковолновых фотонов $\eta_{sd} = 5\%$ и суммарный квантовый выход для межзонного излучения $\eta_d = 20\%$. Получается, что 80% межзонных переходов — безызлучательные. Из-за близости величин ширины запрещенной зоны и энергии спин-орбитального расщепления наиболее вероятен в p -материале оже-процесс за счет переходов электронов из зоны проводимости в валентную зону и дырок из валентной зоны в спин-орбитально отщепленную зону (СННС-процесс), скорость которого зависит от уровня возбуждения почти так же, как и скорость излучательной рекомбинации. Этим объясняется линейность зависимости интенсивности излучения от тока.

Спектры излучения светодиодов с длиной волны максимума $\lambda = 2.44 \text{ мкм}$ имеют такие же признаки межзонной рекомбинации, как и спектры светодиодов с $\lambda = 2.3 \text{ мкм}$. Однако ширина спектральной полосы излучения для них составляет $2k_B T$ при $I < 200 \text{ мА}$ и

заметно увеличивается при больших токах, достигая величины $3k_B T$ при токе $I = 3 \text{ А}$. Это обусловлено электронным типом проводимости активной узкозонной области, в которой электроны вырождены даже при малых токах из-за их малой эффективной массы. Вырождение увеличивается с током из-за малой толщины узкозонной области. Энергия максимума спектральной полосы незначительно возрастает с током, как и должно быть в случае межзонной рекомбинации при большом уровне возбуждения. При примесной рекомбинации энергия максимума не меняется с током, и данный механизм можно не учитывать. В случае значительного участия „хвостов“ зон или при диагональном туннелировании энергия максимума спектральной полосы должна увеличиваться при малых величинах токов сильнее, чем при больших. Поскольку мы наблюдаем обратную картину, данные механизмы рекомбинации также можно считать несущественными. Таким образом, можно сделать вывод, что излучение обусловлено межзонной рекомбинацией.

Большая часть излучения, по-видимому, поглощается в активной области, так как ширина спектральной полосы излучения в 3 раза меньше теоретически рассчитанной при данном уровне вырождения электронов. Доля длинноволновых фотонов в первичном излучении составляет $\sim 20\%$, что соответствует величине $k = \eta_s / \eta_l = 4$.

Величины внутреннего квантового выхода фотонов, определенные по формуле (2) при $k = 4$, $\alpha_e = 1.48 \text{ см}^{-1}$, $\alpha_d = 20 \text{ см}^{-1}$ и $\eta_{\text{ext}} = 0.11\%$, составляют $\eta_l = 1.52\%$, $\eta_s = 6\%$ и $\eta_{\text{int}} = 7.5\%$. В случае замены η_{ext} значением дифференциального внешнего квантового выхода фотонов $\eta_{ed} = 0.17\%$ получается $\eta_{ld} = 2.2\%$, $\eta_{sd} = 9\%$ и $\eta_d = 11.2\%$, т.е. около 90% межзонной рекомбинации является безызлучательной. В данном случае наиболее вероятно оже-рекомбинация СНСС, характерная для полупроводников n -типа проводимости, при которой один электрон из зоны проводимости переходит в валентную зону, а второй совершает внутризонный переход. Таким образом, сохраняется почти линейная зависимость мощности излучения от тока.

6. Заключение

На основе твердых растворов GaInAsSb, выращенных из содержащих свинец растворов-расплавов, были созданы светодиоды с длинами волн максимума спектра $\lambda = 2.3$ и 2.44 мкм . Внешний квантовый выход фотонов при комнатной температуре составил 1.6 и 0.11% соответственно. Данные светодиоды смогут найти широкое применение в системах экологического мониторинга и медицинской диагностики.

Авторы выражают благодарность Н.В. Власенко, Е.В. Кузнецовой, М.Ю. Путиловской за напыление контактов, сборку образцов и измерение ВАХ светодиодов.

Список литературы

- [1] R.J. Becherer. Suppl. to Laser Focus World, May, 71 (1993).
- [2] K. Kincade. Suppl. to Laser Focus World, December, 69 (2003).
- [3] T.L. Troy, S.N. Thennadil. J. Biomedical Optics, **6** (2), 167 (2001).
- [4] Н.Д. Стоянов, Б.Е. Журтанов, А.П. Астахова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37** (8), 996 (2003).
- [5] И.А. Андреев, Е.В. Куницына, Ю.В. Соловьев, Н.А. Чарыков, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **25** (19), 77 (1999).
- [6] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Е.В. Куницына, Я.А. Пархоменко, Д.А. Васюков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **35** (8), 941 (2001).
- [7] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Е.В. Куницына, Я.А. Пархоменко, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев. ФТП, **36** (8), 917 (2002).
- [8] А.М. Литвак, А.Н. Чарыков. ЖФХ, **64** (9), 2331 (1990).
- [9] N.A. Charykov, V.V. Sherstnev, A. Krier. J. Cryst. Growth, **234**, 762 (2002).
- [10] Е.А. Гребенщикова, А.Н. Именков, Б.Е. Журтанов, Т.Н. Данилова, М.А. Сиповская, Н.В. Власенко, Ю.П. Яковлев. ФТП, **38** (6), 745 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

Infrared light-emitting diodes based on a GaInAsSb solid solution grown from Pb-containing melts

A.P. Astakhova, E.A. Grebenshchikova, E.V. Ivanov, A.N. Imenkov, E.V. Kunitsyna, Ya.A. Parkhomenko, Yu.P. Yakovlev

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Light-emitting diodes based on a GaInAsSb solid solution grown from Pb-containing melts have been developed. Analysis of electroluminescence characteristics and their dependence on current and temperature are presented. The external quantum yield at $T = 300$ K was 1.6% and 0.11% for LED2.3 and LED2.44, respectively. For LED2.3 in a quasi-CW mode the average power $P = 0.94$ mW was achieved at $T = 300$ K. At the same time, in a pulse mode the peak power was as high as $P = 126$ mW ($I = 3$ A, $\tau = 0.125$ μ s and $f = 512$ Hz).