

Электролюминесценция светодиодов на основе твердых растворов InGaAs и InAsSbP ($\lambda = 3.3\text{--}4.3$ мкм) в интервале температур 20–180°C (продолжение*)

© М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев[¶], М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин

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

(Получена 5 октября 2000 г. Принята к печати 6 октября 2000 г.)

Созданы и исследованы светодиоды на основе p - n -гомо- и гетероструктур с активными слоями из InAsSbP и InGaAs, мощностью излучения от 0.2 мВт ($\lambda = 4.3$ мкм) до 1.33 мВт ($\lambda = 3.3$ мкм) и коэффициентами преобразования от 30 (InAsSbP, $\lambda = 4.3$ мкм) до 340 мВт/А · см² (двойная гетероструктура InAsSb/InAsSbP, $\lambda = 4.0$ мкм). С ростом тока наблюдалось уменьшение коэффициента преобразования, связанное в основном с джулевым разогревом p - n -гомопереходов. Насыщение мощности при увеличении тока в светодиодах на основе двойных гетероструктур не было связано с нагревом активной области. При повышении температуры светодиодов ($\lambda = 3.3, 4.3$ мкм) от 20 до 180°C происходило падение мощности излучения в 7 и 14 раз, достигая при 180°C значений 50 (1.5 А) и 7 мкВт (3 А) соответственно.

1. Введение

Некоторые практические задачи предполагают использование оптоэлектронных приборов при повышенных температурах. Ранее было показано [1], что свойства светодиодов (СД) с активной областью на основе узкозонных твердых растворов InGaAs (длина волны $\lambda = 3.3$ мкм) и InAsSbP ($\lambda = 4.3$ мкм) сохраняют свои "классические" черты при температурах вплоть до 180°C: температурные зависимости обратных токов в области насыщения определяются возрастанием собственной концентрации носителей заряда в теории Шокли; спектры излучения описываются в предположении прямых переходов зона-зона, сферически симметричных зон и термализованных носителей заряда, мощность излучения экспоненциально уменьшается с увеличением температуры, что характерно для оже-процессов.

В данной работе, являющейся продолжением [1], исследована электролюминесценция СД на основе p - n -гомопереходов в InGaAs ($\lambda = 3.3$ мкм) и InAsSbP ($\lambda = 4.3$ мкм) и СД на основе двойных гетероструктур InAsSb/InAsSbP ($\lambda = 4.0$ мкм) в интервале температур 20–180°C. Показано влияние электронного ограничения на коэффициент преобразования СД ($\lambda = 4.0$ мкм) и приведены данные о долговременной стабильности СД ($\lambda = 3.3$ мкм) при повышенных температурах.

2. Изучаемые объекты и методики исследования

Образцы получали методом жидкофазной эпитаксии, на подложках (n, p)-InAs (111) с концентрацией носителей $\sim 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. В качестве активного слоя СД на

основе p - n -гомоструктур использовались твердые растворы In_{0.95}Ga_{0.05}As ($\lambda = 3.3$ мкм) и InAs_{0.87}Sb_{0.12}P_{0.01} ($\lambda = 4.3$ мкм), аналогичные описанным ранее [1,2]. Для формирования p -слоя в расплав вводилась примесь цинка или марганца, концентрация свободных дырок при этом составляла $p \approx (1-2) \cdot 10^{17}$ см⁻³. Эпитаксиальные слои n -типа проводимости специально не легировались и имели концентрацию электронов $n \approx (1-2) \cdot 10^{17}$ см⁻³. Толщины слоев n -InGaAs и p -InAsSbP составляли 5–10 мкм. Чипы СД ($\lambda = 3.3$ мкм) толщиной ~ 100 мкм монтировались p -подложкой вниз на корпус ТО-18. При этом подача напряжения на СД осуществлялась через золотую подковообразную контактную площадку, расположенную на поверхности чипа рядом с катодом (см. рис. 1 [1]), что приводило к отсутствию линий тока вблизи нерабочей поверхности p -InAs. В СД ($\lambda = 4.3$ мкм) подложка и часть широкозонного слоя стравливались, чипы монтировались p -слоем вниз на кремниевый держатель, имевший размеры $0.4 \times 1.5 \times 1.7$ мм³; вывод излучения осуществлялся через широкозонную часть градиентного слоя n -InAsSbP толщиной 50–80 мкм, так же как и в работе [1].

Светодиоды с длиной волны максимума излучения $\lambda = 4.0$ мкм были изготовлены из двойных гетероструктур (ДГС), состоящих из нелегированной подложки n -InAs (111) с $n = (1-2) \cdot 10^{16}$ см⁻³ и трех эпитаксиальных слоев: прилегающего к подложке широкозонного ограничивающего слоя n -InAs_{1-x-y}Sb_xP_y ($0.05 \leq x \leq 0.09$, $0.09 \leq y \leq 0.18$), активной области n -InAs_{1-w}Sb_w ($w \approx 0.07$) и широкозонного эмиттера p (Zn)-InAs_{1-x-y}Sb_xP_y ($0.05 \leq x \leq 0.09$, $0.09 \leq y \leq 0.18$). При выращивании активной области использовался расплав, содержащий гадoliniй в количестве $X_{\text{Gd}}^1 = 0.004\text{--}0.005$ ат%, что приводит, согласно [3], к наименьшему содержанию остаточных примесей и максимальной подвижности носителей. Толщины широкозонных слоев составляли 3–5 мкм, активной области

[¶] E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru
 Фах: 7 (812) 247 43 24

* М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, 34 (1), 99 (2000).

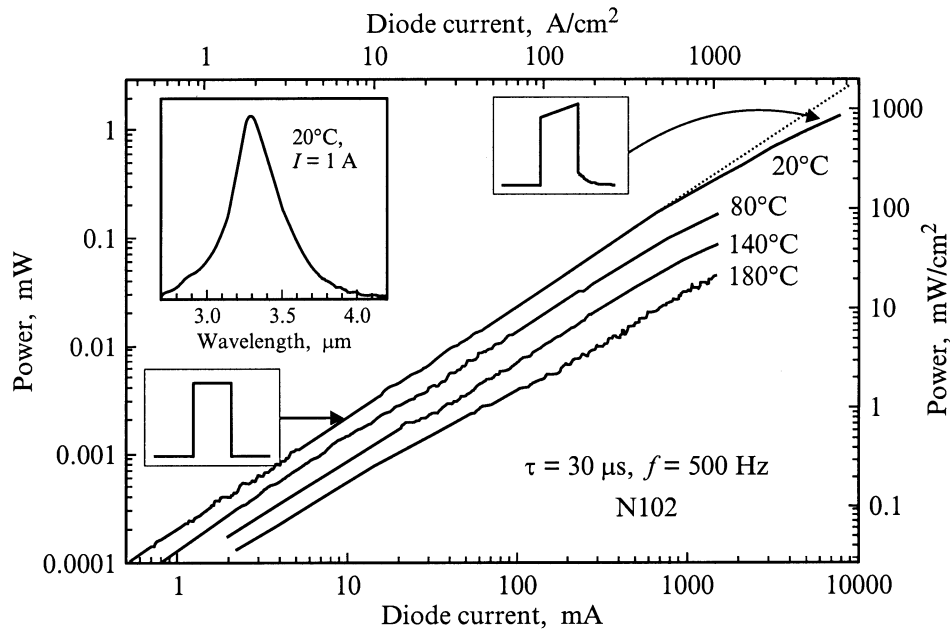


Рис. 1. Зависимости мощности от тока для СД с p - n -гомопереходом в InGaAs ($\lambda = 3.3$ мкм) при $T = 20, 80, 140, 180^\circ\text{C}$. На вставках — спектр излучения при $T = 20^\circ\text{C}$, $I = 1$ А, осциллограммы сигнала на выходе с фотоприемника.

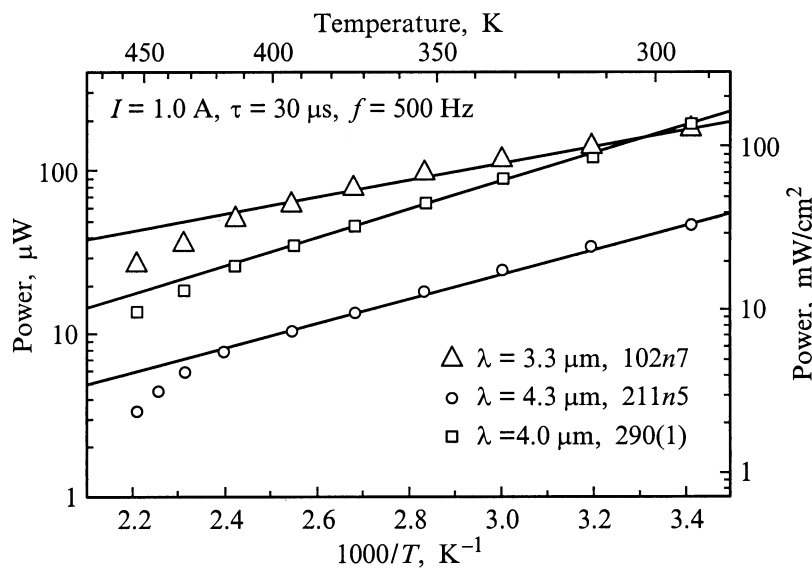


Рис. 2. Зависимости мощности от температуры СД ($\lambda = 3.3, 4.0, 4.3$ мкм) при $I = 1.0$ А.

6 мкм, подложка, исходно имевшая толщину 350 мкм, сошлифовывалась и(или) стравливалась до толщины 100 мкм. Чипы монтировались p -стороной вниз на кремниевый держатель; вывод излучения осуществлялся через подложку.

Измерения электролюминесценции (ЭЛ) проводились в импульсном режиме при длительности импульсов $\tau = 30$ – 500 мкс, частоте $f = 500$ Гц на образцах, имевших мезу диаметром 430 мкм. Спектры излучения регистрировались охлаждаемым до температуры 77 К фотодиодом на основе InSb. Измерения ватт-амперных

характеристик были выполнены с помощью калиброванного охлаждаемого (77 К) фотодиода на основе HgCdTe с учетом диаграммы направленности СД.

3. Экспериментальные результаты

1. Светодиоды ($\lambda = 3.3$ мкм) на основе p - n -гомоперехода в InGaAs

На рис. 1 представлены ватт-амперные (L - I) характеристики СД на основе p - n -гомоперехода в InGaAs

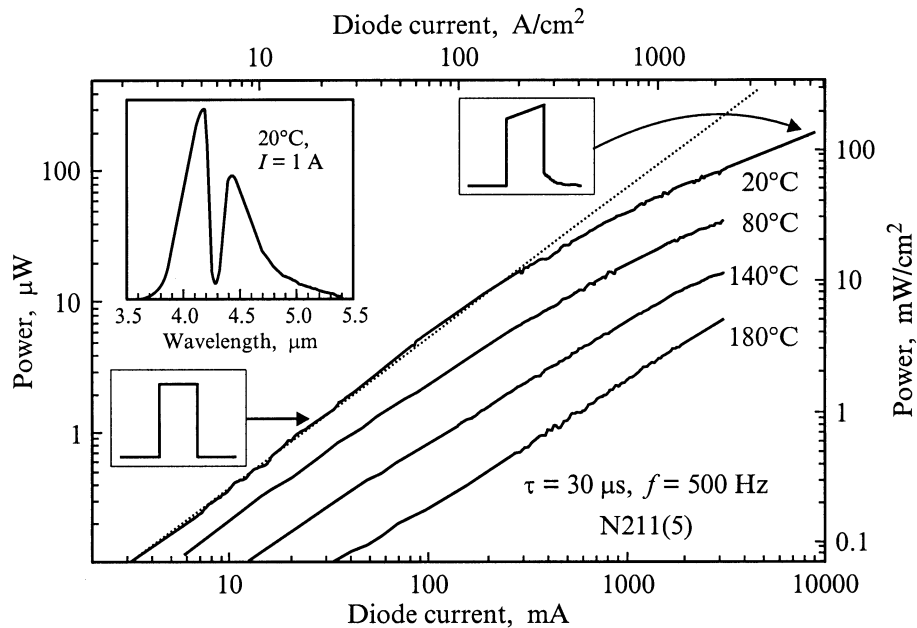


Рис. 3. Зависимости мощности от тока для СД с $p-n$ -гомопереходом в InAsSbP ($\lambda = 4.3$ мкм) при $T = 20, 80, 140, 180^\circ\text{C}$. На вставках — спектр излучения при $T = 20^\circ\text{C}$, $I = 1$ А, осциллограммы сигнала на выходе с фотоприемника.

при температурах $T = 20, 80, 140, 180^\circ\text{C}$; на вставках изображены: спектр излучения СД при $T = 20^\circ\text{C}$ и рабочем токе $I = 1$ А и осциллограммы сигнала на выходе с фотоприемника на линейном и сублинейном участках $L-I$ -характеристики. Максимальная мощность излучения при комнатной температуре составила 1.33 мВт (917 мВт/см 2) при $I = 8$ А. Ватт-амперная характеристика линейна вплоть до $I = 1$ А с коэффициентом преобразования (КП) 167 мВт/А · см 2 и квантовым выходом 0.07% ; при больших токах характеристика сублинейна, КП уменьшается до 50 мВт/А · см 2 при $I = 8$ А. Увеличение длительности импульсов от 30 до 500 мкс приводит к уменьшению линейного участка характеристики до $I = 0.4$ А и практически полному насыщению мощности при $I = 1$ А. На линейном участке $L-I$ -характеристики сигнал с фотоприемника имеет прямоугольную форму, повторяя форму импульса тока накачки (см. вставку к рис. 1). На сублинейном участке $L-I$ -характеристики сигнал с фотоприемника отличается от прямоугольного наличием пилообразной составляющей и экспоненциальным спадом после окончания импульса тока (см. вставку к рис. 1). При пропускании излучения СД через сапфировую пластину, фильтрующую излучение с $\lambda \leq 5.5$ мкм, сигнал с фотоприемника приобретал прямоугольную форму.

При увеличении температуры до $T \approx 150^\circ\text{C}$ происходило экспоненциальное уменьшение мощности: $P = P_0 \exp(E_A/kT)$, где P_0 — мощность при комнатной температуре, E_A — характеристическая энергия, k — постоянная Больцмана (см. рис. 2). Характеристическая энергия $E_A = 43$ мэВ близка к величине, характерной для оже-процессов СНСС [4]. При величинах температуры от 20 до 180°C наблюдалось семикратное уменьшение

квантового выхода и КП — до 0.01% и 24 мВт/А · см 2 соответственно. Спектры излучения смещались в длинноволновую сторону в соответствии с температурным сужением запрещенной зоны, температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны dE_g/dT , определенный по спектрам, составил $3.6 \cdot 10^{-4}$ эВ/К.

2. Светодиоды ($\lambda = 4.3$ мкм, 20°C) на основе $p-n$ -гомоперехода в градиентном слое InAsSbP

На рис. 3 представлены $L-I$ -характеристики СД на основе $p-n$ -гомоперехода в градиентном слое InAsSbP при $T = 20, 80, 140, 180^\circ\text{C}$; на вставках изображены: спектр излучения СД при $T = 20^\circ\text{C}$ и рабочем токе $I = 1$ А и осциллограммы сигнала на выходе с фотоприемника на линейном и сублинейном участках $L-I$ -характеристики. Максимальная мощность излучения при комнатной температуре составила 0.2 мВт (140 мВт/см 2) при $I = 8$ А. $L-I$ -характеристика линейна вплоть до $I = 250$ мА с КП 30 мВт/А · см 2 и квантовым выходом 0.02% , при больших токах $L-I$ -характеристика сублинейна; КП уменьшается до 9.4 мВт/А · см 2 при $I = 8$ А. Увеличение длительности импульсов до 500 мкс снижало КП при $I \geq 1.5$ А, приводя к насыщению мощности при $I = 3$ А. Формы импульса сигнала на выходе с фотоприемника на линейном и сублинейном участках $L-I$ -характеристики имела те же характерные особенности, что и для СД ($\lambda = 3.3$ мкм) (см. вставку к рис. 2). При увеличении температуры от 20 до 180°C наблюдалось уменьшение квантового выхода, КП и мощности излучения до 0.0014% , 5 мВт/А · см 2 и 2.5 мкВт ($I = 1$ А) соответственно (см. рис. 2). Спектры излучения смещались в длинноволновую сторону в соответствии с температурным сужением запрещенной зоны, темпера-

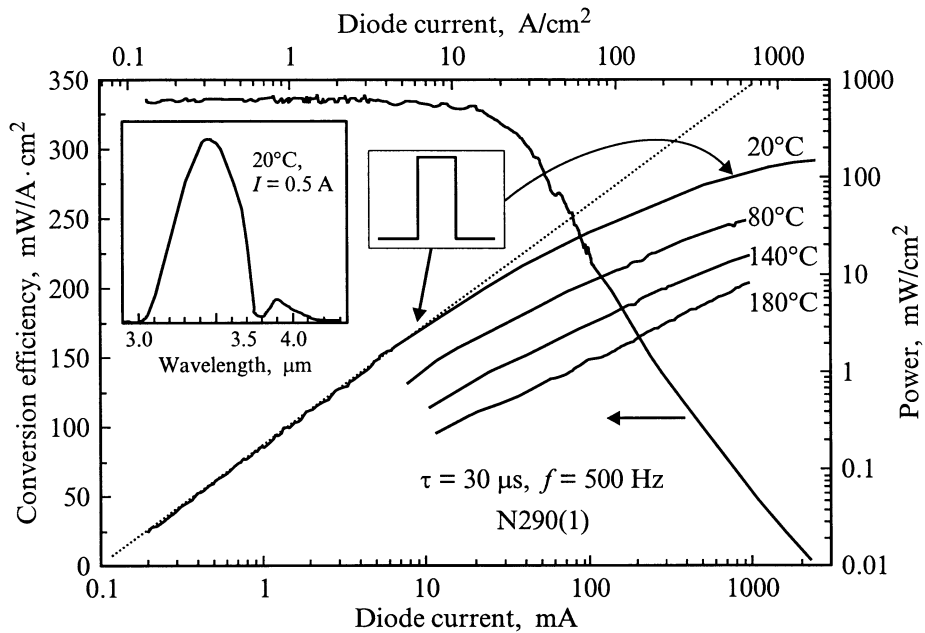


Рис. 4. Зависимости мощности от тока для СД на основе ДГС InAsSb/InAsSbP ($\lambda = 4.0$ мкм) при $T = 20, 80, 140, 180^\circ\text{C}$ и зависимость коэффициента преобразования от тока при $T = 20^\circ\text{C}$. На вставках — спектр излучения при $T = 20^\circ\text{C}$, $I = 1$ А, осциллограммы сигнала на выходе с фотоприемника.

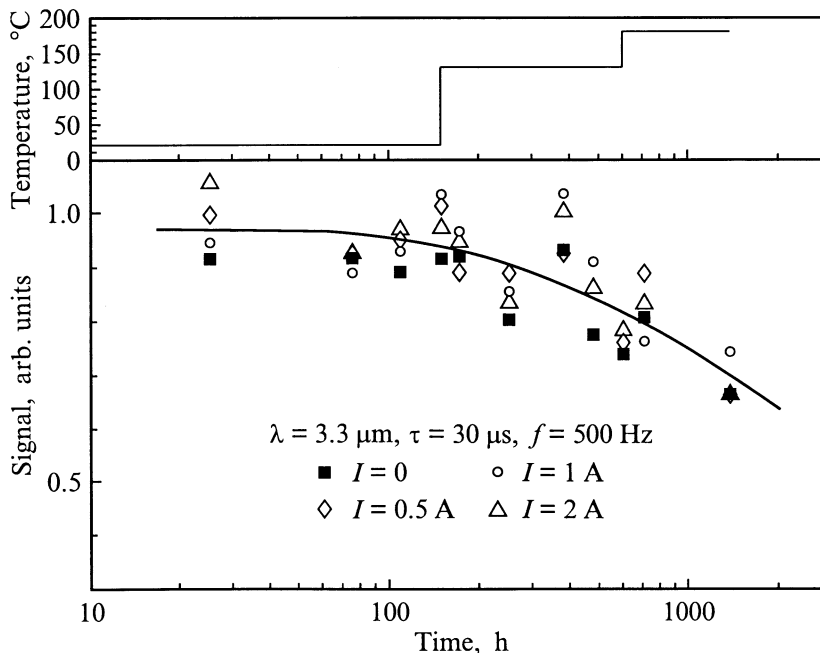


Рис. 5. Деградация СД ($\lambda = 3.3$ мкм) при I , А: 0 (2 образца), 0,5 (2 образца), 1 (2 образца), 2 (4 образца). $T = 20, 130, 180^\circ\text{C}$.

турный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны dT_g/dT составил $3.5 \cdot 10^{-4}$ эВ/К.

3. Светодиоды ($\lambda = 4.0$ мкм, 20°C) на основе двойных гетероструктур InAsSb(Gd)/InAsSbP

На рис. 4 представлены $L-I$ -характеристики СД на основе ДГС InAsSb(Gd)/InAsSbP при $T = 20, 80, 140, 180^\circ\text{C}$, зависимость КП от тока при $T = 20^\circ\text{C}$, на

вставках изображены: спектр излучения при $T = 20^\circ\text{C}$ и $I = 1$ А и осциллограммы сигнала на выходе с фотоприемника на линейном и сублинейном участках $L-I$ -характеристики. Максимальная мощность излучения при комнатной температуре составила 0.23 мВт (156 мВт/см²) при $I = 2.5$ А. $L-I$ -характеристика линейна вплоть до $I = 20$ мА (плотность тока $j = 15$ А/см²),

КП на этом участке составляет $340 \text{ мВт/А} \cdot \text{см}^2$, квантовый выход 0.2%. Увеличение длительности импульсов до 500 мкс не изменяло ватт-амперную характеристику. Форма импульса сигнала на выходе с фотоприемника как на линейном, так и на сублинейном участках $L-I$ -характеристики оставалась прямоугольной (см. вставку к рис. 4). При увеличении температуры от 20 до 180°C наблюдалось уменьшение квантового выхода и мощности излучения до 0.017% и 12 мкВт (1.0 А) соответственно (см. рис. 2).

4. Исследования стабильности светодиодов ($\lambda = 3.3 \text{ мкм}$)

На рис. 5 представлены данные о долговременном изменении свойств СД ($\lambda = 3.3 \text{ мкм}$). Вверху показаны время наработки и температура среды, в которой находились СД. Образцы работали при токах $I = 0, 0.5, 1, 2 \text{ А}$ в течение 150 ч при комнатной температуре, 450 ч при $T = 130^\circ\text{C}$ и 800 ч при $T = 180^\circ\text{C}$. СД охлаждались до комнатной температуры и затем нагревались до $T = 130^\circ\text{C}$ 8 раз и до 180°C 3 раза. На нижнем графике приведена зависимость мощности излучения от времени наработки. Как видно, после работы в течение 1400 ч наблюдалось уменьшение мощности излучения в среднем на 25%. Заметим, что на деградацию СД не влияла величина рабочего тока. С увеличением времени наработки происходило увеличение обратных токов от 0.5–1 мА (0 ч) до 3–4 мА (1400 ч) при напряжении $U = 1 \text{ В}$. После "очистки" поверхности образцов при травлении в травителе SP-4 обратные токи возвращались к своим первоначальным значениям, при этом мощность имела тенденцию к восстановлению своего первоначального значения: $P(1400 \text{ ч}) = 0.85 - 0.9P(0 \text{ ч})$.

4. Обсуждение

На рис. 6, *a* приведен КП СД на основе $p-n$ -гомопереходов и ДГС, излучающих в диапазоне длин волн $\lambda = 3.3 - 5.5 \text{ мкм}$ ($T = 20^\circ\text{C}$). Экспериментальное значение, соответствующее длине волны $\lambda = 5.5 \text{ мкм}$, было получено на образце СД на основе InAsSb, аналогичном описанному в [5]. Как видно, КП СД на основе $p-n$ -гомопереходов экспоненциально уменьшается с увеличением длины волны, что, во-видимому, связано с увеличением роли безызлучательной оже-рекомбинации в материалах с меньшей шириной запрещенной зоны.

В СД на основе $p-n$ -гомопереходов $L-I$ -характеристика линейна в диапазоне токов до 0.25–1 А, при больших токах происходит уменьшение КП. Спектр излучения СД есть сумма спектра электрولюминесценции и спектра нагретого тела. Поэтому спад излучения после прекращения импульса тока накачки, характерный для сублинейного участка $L-I$ -характеристики, свидетельствует о разогреве СД. Присутствие "теплового сигнала" проявляется также и в росте интенсивности излучения в процессе импульса (т.е. в "пилообразности" формы оптического сигнала). Отметим, что спад "теплового сигнала" происходит за очень короткий промежуток

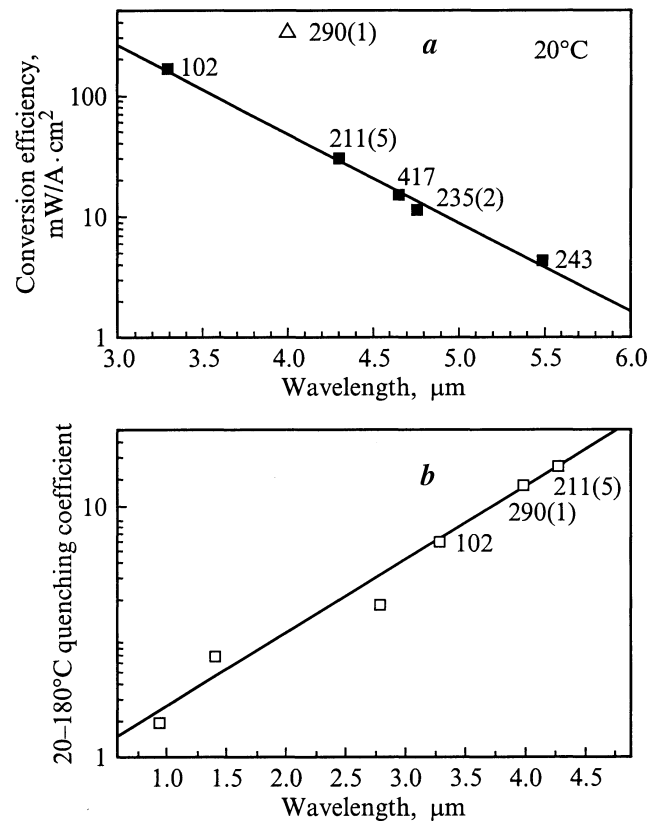


Рис. 6. Зависимости коэффициента преобразования при 20°C (*a*) и коэффициента гашения мощности для СД ($20-180^\circ\text{C}$) на основе ДГС (290(1)) и $p-n$ -гомопереходов (*b*) от длины волны.

времени, что является следствием высокой теплопроводности материалов $A^{III}B^V$. Оценки, проведенные с учетом величины "теплового сигнала" и перекрытия спектров нагретого тела и чувствительности фотоприемника из КРТ (кадмий–ртуть–теллур), показывают, что за 30 мкс СД разогревается на температуру $\Delta T = 20 - 50^\circ\text{C}$. Полученное значение нагрева, соотношенное с температурной зависимостью мощности излучения, позволяет сделать вывод об определяющем вкладе разогрева в уменьшение КП при больших токах. Заметим, что конструкция СД ($\lambda = 3.3 \text{ мкм}$) не является оптимальной, поскольку в ней присутствует относительно толстый ($\sim 50 \text{ мкм}$) слой $p\text{-InGaAs}$. Следствием этого является высокое последовательное сопротивление и удаленность активной области от теплоотвода. Обе вышеуказанные особенности вносят вклад в разогрев СД. В противоположность этому в более длинноволновых СД ($\lambda > 4 \text{ мкм}$) толщина p -слоя составляет менее 10 мкм, что с учетом высокой проводимости n -слоев обеспечивает в 2–3 раза меньшее по сравнению с СД ($\lambda = 3.3 \text{ мкм}$) последовательное сопротивление. Кроме этого близость теплоотвода в СД, смонтированных p -слоем "вниз" на держатель, должна обеспечивать хороший теплосъем и независимость выходных параметров СД от длительности и амплитуды импульса тока накачки.

Действительно, в СД ($\lambda = 4$ мкм) нами не было обнаружено вышеуказанных особенностей, характерных для разогретых током накачки СД. При этом в СД ($\lambda = 4.0$ мкм) на основе ДГС InAsSb/InAsSbP (структура 290(1) на рис. 6, а) было получено рекордно высокое значение КП (340 мВт/А · см²). Высокая эффективность работы СД на основе ДГС, по-видимому, связана с тем, что излучательная рекомбинация происходит в активной области *n*-типа проводимости, в которой оже-рекомбинация более слабая, чем в материале *p*-типа, являющемся "активным" в гомосветодиодах из-за высокой подвижности электронов. Кроме этого из-за электрического ограничения в ДГС излучение формируется в узкой области толщиной менее 6 мкм, поэтому можно ожидать уменьшения самопоглощения при выводе излучения из активной области. В гомосветодиодах большая толщина области рекомбинации, определяемая диффузионной длиной электронов и составляющая несколько десятков микрометров [6], имеет следствием существенные потери на поглощение. Среди причин высокого КП СД на основе ДГС можно назвать также уменьшение скорости безызлучательной рекомбинации, обусловленное геттерирующим действием редкоземельных элементов [3], сопровождаемое снижением концентрации дефектов (безызлучательных центров) и уменьшением свободных носителей в кристаллизующейся твердой фазе.

Преимущества СД на основе ДГС оказались, однако, ограниченными областью малых токов — $I < 20$ мА (15 А/см²): при больших токах наблюдается существенное снижение КП. По-видимому, электрическое ограничение в ДГС является причиной существенного роста концентрации инжектированных носителей и соответственно роста оже-рекомбинации. Подобная ситуация наблюдалась в [7], когда в СД ($\lambda = 3.45$ мкм) был получен КП ~ 400 мВт/А · см² при токах до 3 мА (10 А/см²). В гомосветодиодах носители "размазаны" по большому объему и влияние оже-процессов слабее, сублинейность L – I -характеристики незначительна.

Следует признать, что вышеприведенные соображения не объясняют всех деталей поведения выходной мощности СД. Так, например, в СД ($\lambda = 4.3$ мкм) имеет место разогрев активной области, хотя СД ($\lambda = 4.3$ мкм) монтировались *p*-стороной на теплоотвод. Насыщение мощности при увеличении длительности импульса до 500 мкм происходит при больших токах по сравнению со СД ($\lambda = 3.3$ мкм); с другой стороны, падение КП при коротких импульсах в СД ($\lambda = 4.3$ мкм) начинается с меньших токов по сравнению со СД ($\lambda = 3.3$ мкм). Вероятнее всего, что в СД ($\lambda = 4.3$ мкм) одновременно действуют две причины снижения КП: разогрев и оже-рекомбинация. Отметим, что разогрев активной области в СД ($\lambda = 4.3$ мкм), как основная причина ограничения мощности при токах более 100 мА, отмечался также в работе [8].

Уменьшение мощности с ростом температуры в интервале 20–180 °С не описывается одной экспонентой, что указывает на действие нескольких механизмов, например

оже-рекомбинации и поглощения на свободных носителях. Поэтому для описания температурного изменения мощности СД удобно ввести коэффициент гашения мощности (КГМ), определяемый как отношение мощности при комнатной температуре к мощности при $T = 180$ °С. На рис. 6, б приведены данные по КГМ для СД, излучающих в интервале длин волн $\lambda = 0.87$ –4.3 мкм. Ток через СД составлял 2 А, значения мощности для длин волн $\lambda = 0.87$ и 1.2 мкм ($T = 20$ °С) были получены с СД на основе ДГС GaAlAs/GaAs и InGaAsP/InP соответственно, а для $\lambda = 2.9$ мкм — в СД на основе *p*–*n*-гомоперехода в InGaAs. Как видно, КГМ экспоненциально растет с длиной волны. Это указывает на то, что основной причиной уменьшения мощности с ростом температуры является возрастание оже-рекомбинации. Заметим, что КГМ составил 7 для СД ($\lambda = 3.3$ мкм) и 14 для СД ($\lambda = 4.3$ мкм), что в 2 раза меньше значений, полученных нами ранее [1], и связано с улучшенной постростовой обработкой.

5. Заключение

В СД ($\lambda = 3.3$ мкм) максимальная мощность излучения при комнатной температуре составила 1.33 мВт (917 мВт/см², $I = 8$ А), что, насколько нам известно, является наибольшим значением мощности для СД ($\lambda = 3.3$ мкм), КП составил 167 мВт/А · см², что почти в 1.5 раза больше значения 115 мВт/А · см², полученного для СД ($\lambda = 3.3$ мкм) в работе [9]. В СД ($\lambda = 4.3$ мкм) КП составила 30 мВт/А · см², что близко к значениям, полученным в [10] (18 мВт/А · см²) и [11] (40 мВт/А · см²) для СД на основе сверхрешеток InAs/InAsSb. В СД ($\lambda = 4.0$ мкм) на основе ДГС было получено значение КП 340 мВт/А · см², которое в 7 раз превосходит значение КП в СД на основе *p*–*n*-гомопереходов с той же длиной волны, ожидаемое из рис. 6, а.

Коэффициент преобразования и соответственно мощность излучения в СД на основе *p*–*n*-гомопереходов экспоненциально падает с увеличением длины волны, отражая увеличение роли безызлучательной оже-рекомбинации при уменьшении ширины запрещенной зоны активной области. Уменьшение КП и мощности излучения с ростом тока в СД на основе *p*–*n*-гомопереходов связано в основном с разогревом активной области СД, в то время как насыщение мощности в СД на основе ДГС носит нетепловой характер.

С ростом длины волны СД увеличивается температурное падение мощности, отражая возрастание оже-рекомбинации при уменьшении ширины запрещенной зоны материала.

Авторы выражают благодарность за поддержку работы со стороны газонефтяной корпорации Schlumberger Oilfield Services.

Работа выполнена при административной поддержке Фонда гражданских исследований и развития США для стран СНГ (CRDF).

Список литературы

- [1] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **34** (1), 99 (2000).
- [2] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. Письма ЖТФ, **17** (23), 75 (1991).
- [3] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **33** (8), 1010 (1999).
- [4] S. Kim, M. Erdtmann, D. Wu, E. Kass, H.Yi, J. Dias, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **69** (11), 1614 (1996).
- [5] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. Письма ЖТФ, **24** (6), 88 (1998).
- [6] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Nano/index.html>
- [7] M.J. Kane, G. Braithwaite, M.T. Emeny, D. Lee, T. Martin, D.R. Wright. Appl. Phys. Lett., **76** (8), 943 (2000).
- [8] А.А. Попов, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **24** (2), 34 (1998).
- [9] M.K. Parry, A. Krier. Electron. Lett., **30** (23), 1968 (1994).
- [10] M.J. Pullin, H.R. Hardaway, J.D. Heber et al. Appl. Phys. Lett., **74** (16), 2384 (1999).
- [11] A. Allerman, R.M. Biefeld, S.R. Kurtz. Appl. Phys. Lett., **69** (22), 465 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

Electroluminescence of light-emitting diodes on the base of InAsSbP and InGaAs ($\lambda = 3.3\text{--}4.3 \mu\text{m}$) at the 20–180°C temperature range

M. Aydaraliev, N.V. Zotova, S.A. Karandashev,
B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus',
G.N. Talalakin

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

Abstract Homo and double heterostructure light emitting diodes based on InAsSbP and InGaAs solid solutions with output and conversion efficiency ranging from 0.2 mW ($\lambda = 4.3 \mu\text{m}$) to 1.33 mW ($\lambda = 3.3 \mu\text{m}$) and from 30 (InAsSbP, $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$) to 340 mW/A · cm² (DH InAsSb/InAsSbP, $\lambda = 4.0 \mu\text{m}$) respectively have been fabricated and studied. Sublinear power growth with the current increase is explained mostly by Joule heating of homo $p\text{--}n$ junction, however power saturation in DH LEDs has nonthermal origin. On a temperature increase from 20 to 180°C the LED $\lambda = 3.3$ and $4.3 \mu\text{m}$ outputs and conversion efficiencies drop down as 7 and 14 fold and 50 (1.5 A) and 7 μW (3 A) respectively.