

06.3;07;12

2.35 μm светодиоды для измерения метана

© А.А. Попов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев

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

Поступило в Редакцию 30 июня 1997 г.

Созданы светодиоды на основе двойной гетероструктуры GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, излучающие в области полосы поглощения метана на длине волны 2.35 μm для быстродействующих газоанализаторов. Рассмотрены различные конструкции двойных гетероструктур на основе твердого раствора GaInAsSb. Достигнута непрерывная (CW) оптическая мощность — 1.2 mW. Представлен спектр поглощения излучения светодиода метаном.

Диапазон длин волн 2.35 μm характеризуется наличием многочисленных колебательно-вращательных полос поглощения углеводородов C–H [1] и является перспективным для спектральных приложений, в частности для экологического и технологического контроля окружающей среды [2]. Привлекательным полупроводниковым излучателем для данного спектрального диапазона являются светодиоды на основе многокомпонентных твердых растворов GaInAsSb [3–4]. Ранее сообщалось о создании светодиодов на основе твердых растворов GaInAsSb для широкого спектрального диапазона 1.7–2.4 μm , внешний квантовый выход для светодиодов с $\lambda = 2.3\text{--}2.4 \mu\text{m}$ составлял $\sim 1.2\%$ [4]. Отличительной чертой электролюминесценции таких структур была конкуренция межзонной объемной и интерфейсной рекомбинации в области гетероперехода II-типа $n\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}$, определяющая спектральную плотность мощности полупроводникового излучателя. Как было показано, оптимальное соотношение между излучательными и безизлучательными каналами рекомбинации достигается, когда величина разрыва зоны проводимости на гетеропереходе II типа не превышает 200 meV [5].

Настоящая работа является продолжением наших работ в области инфракрасных излучающих гетероструктур на основе GaInAsSb. Она посвящена светодиодам, не содержащим гетеропереход II типа GaSb/GaInAsSb и предназначенным для спектрального детектирования углеводородов в области длин волны 2.3 μm .

Светоизлучающие диоды представляли собой двойную симметричную гетероструктуру GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, выращенную методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложке GaSb (100). Технология эпитаксии гетероструктур сообщалась ранее [6]. Структуры состояли из четырех эпитаксиальных слоев — активный слой GaInAsSb был заключен между двумя широкозонными эмиттерами N - и P -GaAlAsSb (толщиной $2.5 \mu\text{m}$), узкозонный сильнолегированный слой GaSb (толщиной $0.5 \mu\text{m}$) наращивался с целью создания низкоомного контакта. Все слои были согласованы по периоду решетки с подложкой GaSb. Активный слой GaInAsSb характеризовался содержанием индия 0.21 ($F_g = 0.53 \text{ eV}$). Широкозонные ограничивающие слои GaAlAsSb легировались Te и Ge до концентрации $(2-4) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и $(6-8) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ для слоев N - и P -типа соответственно. Активный слой GaInAsSb был легирован Te до концентрации электронов $(1-2) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Светодиодные гетероструктуры были исследованы в зависимости от толщины активной области в интервале от 0.5 до $1.6 \mu\text{m}$. Было найдено, что максимальная эффективность излучательной рекомбинации имеет место при толщинах активной области порядка $0.6 \mu\text{m}$. Отметим, что оптимальная толщина оказалась значительно меньше диффузионной длины ($\sim 2 \mu\text{m}$) носителей. Увеличение и уменьшение толщины приводило к падению выходной мощности.

Были выращены и исследованы светодиодные гетероструктуры трех типов: первого типа — $p-P-n-N-n$ (I), второго типа — $n-N-n-P-p$ (II), третьего типа — $n-N-n-P-p$ (III). Эпитаксиальные структуры первых двух типов выращивались с содержанием Al — 0.50 ($E_g = 1.1 \text{ eV}$) и отличались между собой типом легирования. Гетероструктура первого типа (I) выращивалась на подложке p -типа легированной Ge до концентрации дырок $p \sim (7-9) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Структура второго типа (II) создавалась на подложке n -типа $n \sim (1-3) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Гетероструктура третьего типа (III) была аналогична структуре II, однако содержание Al в эмиттерных областях было снижено до 34% ($E_g = 1.0 \text{ eV}$). Следует отметить, что во всех трех типах светодиодов активная область легировалась Te до концентрации носителей $n \sim (1-2) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Зонные энергетические диаграммы и схемы созданных гетероструктур трех типов представлены на рис. 1. Это позволило получить и исследовать гетероструктуры, не содержавшие гетероперехода II типа GaSb/GaInAsSb и различавшиеся характеристиками эмиттерных областей.

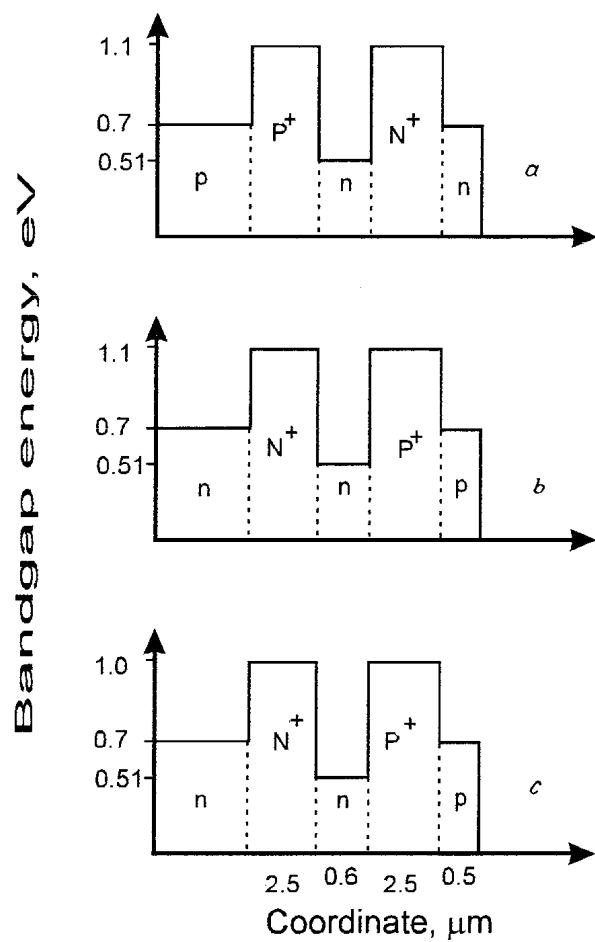


Рис. 1. Зонные энергетические диаграммы светодиодных гетероструктур: первого типа — $p-P-n-N-n$ (*a*), второго типа — $n-N-n-P-p$ (*b*), третьего типа — $n-N-n-P-p$ (*c*). Структуры первых двух типов (*a* и *b*) в эмиттерных слоях содержат Al — 0.50% и различаются между собой типом легирования. Гетероструктура третьего типа (*c*) в эмиттерных слоях содержит Al — 34%.

Исследовались круглые меза-диоды, полученные с помощью фотолитографии и глубокого химического травления в подложку. Полный размер кристалла одиночного светодиода составлял $500 \cdot 500 \mu\text{m}$. Площадь излучающей поверхности S составляла $\sim 7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$, определялась диаметром мезы ($300 \mu\text{m}$). Полупроводниковый кристалл монтировался на стандартный корпус ТО-18. Одновременно на корпус монтировался параболический отражатель, что позволяло сколлаимировать излучение светодиодов в телесном угле $10\text{--}12$ градусов. Полные размеры светодиода с параболическим отражателем составляли 9 mm в диаметре и $5,5 \text{ mm}$ в длину.

Исследования проводились на установке, выполненной по схеме синхронного детектирования на основе монохроматора МДР-2 и GaInAsSb фотодиода. Выходное излучение собиралось на измеритель оптической мощности ИМО-2М.

Вольт-амперные характеристики светодиодов (ВАХ) имели диодный характер. ВАХ гетероструктур отличались друг от друга напряжением отсечки, которое составляло $0,26 \text{ V}$ для структуры I, $0,70 \text{ V}$ для структуры II и $0,57 \text{ V}$ — для структуры III. Для всех структур при прямом смещении последовательные сопротивления составляли $\sim 5\text{--}6 \Omega$, а ВАХ (I и III типа) имели два участка с точкой перегиба, лежавшей в области токов 6 mA . В области малых смещений ВАХ можно описать формулой: $I = I_0 \exp(eU/\beta kT)$, где e — заряд электрона, T — температура, I_0 — ток насыщения, который составлял для структур I–III соответственно $0,05$, $0,012$ и $0,18 \mu\text{A}$, а коэффициент β составлял $1,4\text{--}1,5$.

Спектральные и мощностные характеристики диодов тестировались в непрерывном (CW) режиме при комнатной температуре. Излучение наблюдалось при прямом смещении, когда амплитуда тока превышала 2 mA . Резкий подъем мощности наблюдался до токов инжекции 20 mA .

Для всех структур спектр спонтанного излучения состоял из одиночной полосы излучения с типичным для инфракрасных светодиодов контуром (рис. 2). При токе 50 mA максимум спектра структур I, II и III соответственно наблюдался на длине волны $\lambda = 2,327$, $2,332$ и $2,305 \mu\text{m}$. Соответствующие ширины спектров (FWHM) составляли $0,27$, $0,22$ и $0,25 \mu\text{m}$. На рис. 2 приведенный спектр поглощения излучения светодиода ячейкой, заполненной метаном при атмосферном давлении, подтверждает перспективность использования исследованных светодиодов для детектирования углеводородов методами абсорбционной спектроскопии при комнатной температуре. При охлаждении

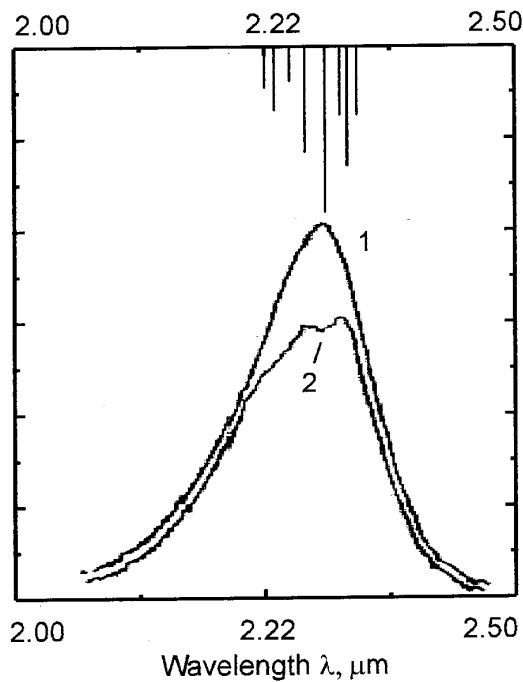


Рис. 2. Спектр излучения светодиода V22718 (кривая 1), записанный при непрерывном режиме питания и комнатной температуре ($T = 300$ К). Ток инжекции 50 mA DC. Ширина FWHM спектра излучения — $0.22 \mu\text{m}$. Спектр поглощения излучения светодиода метаном при атмосферном давлении, записанный при тех же условиях, представлен кривой 2. Длина кюветы составляла 2.5 см. Для сравнения положение и относительная интенсивность линий поглощения метана, построенные на основании базы данных HITRAN92 [1], приведены в верхней части рисунка.

до температуры жидкого азота ($T = 77$ К) максимум смещался в коротковолновую сторону к $\lambda = 2.1 \mu\text{m}$ для первых двух типов структур и $2.06 \mu\text{m}$ для третьей структуры. Ширина спектра излучения FWHM сужалась до $0.085\text{--}0.095 \mu\text{m}$ для всех светодиодов. Отметим следующие наблюдавшиеся особенности спектров спонтанной рекомбинации. Положение максимума излучения слабо зависело от величины

инжектированного тока, причем сдвиг наблюдался в длинноволновую сторону со средней скоростью 0.05 nm/m. Общий температурный сдвиг максимума соответствовал 54–55 meV. Все значения оказались на 8–15 meV меньше расчетного температурного уширения запрещенной зоны ΔE_g . Спектр излучения характеризовался большим уширением как при комнатной (45–60 meV FWHM), так и при азотной (24–27 meV FWHM) температурах.

Токовые зависимости выходной оптической мощности представлены на рис. 3. Оптическая мощность P нарастала до токов порядка $I = 120$ mA и содержала три участка с разным показателем степени. До 40 mA зависимость характеризовалась сверхлинейным ростом. В области токов до 120 mA ее наклон уменьшался, а свыше 120 mA — характеристика насыщалась. При охлаждении до азотной температуры выходная мощность возрастала от 8 (для структуры I) до 25 (для структуры II) раз. Однако зависимость, построенная для структур типа II, характеризовалась большей выходной мощностью во всем диапазоне токов. Максимальная непрерывная мощность — 1.2 mW была достигнута при инжекционном токе 120 mA для структур типа II. Значение внешнего квантового выхода при токе 50 mA составило 2.25 и 1.7% для структур I, II и III типа соответственно.

Приведенные характеристики показали соответствие спектральных и электрических характеристик двойных гетероструктур GaInAsSb/GaAlAsSb в целом рекомбинации в объеме активной области. Измерения позволили выделить зависимость спектральных и мощностных характеристик от параметров эмиттерных слоев. Введение дополнительного GaAlAsSb эмиттера позволило увеличить квантовый выход излучения с 1.25% (несимметричная гетероструктура с интерфейсом II типа [4]) до 1.75% (структура III). Дальнейшее увеличение высоты гетеробарьеров (структуры типа I и II) усилило эффективность канала излучательной рекомбинации до 2–2.5%. Однако для всех структур смена сверхлинейной токовой зависимости оптической мощности ($n > 1$) на сублинейную ($n < 1$) свидетельствовала о существенном усилении безызлучательных потерь с ростом инжекционного тока. В первую очередь, уменьшение эффективности излучательной рекомбинации следует связать с перегревом активной области при росте непрерывного инжекционного тока [7] за счет как возросшего теплового сопротивления оттока тепла в подложку через четырехкомпонентный твердый раствор, так

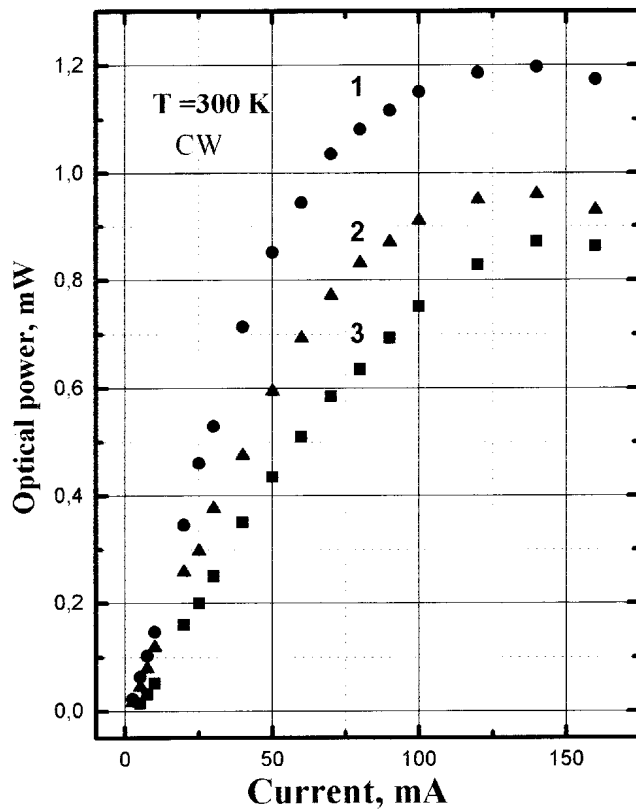


Рис. 3. Мощностные характеристики светодиодов. Зависимости получены при питании постоянным током и комнатной температуре. Для структур первого типа — 1, второго типа — 2 и третьего типа — 3.

и увеличения инжекции горячих носителей. Дополнительно, сильное легирование эмиттеров и большая высота интерфейса способствуют усилению туннельных токов утечки, однако уменьшают плотность прямого тока в эмиттерах. Для структур типа I слабая температурная зависимость и малая мощность излучения свидетельствовали о наличии туннельных утечек носителей, скорее всего, имеющих место на N/n гетерогранице с активной областью. Тем не менее

в области малых токов питания наиболее привлекательной для достижения максимальной спектральной плотности мощности оказывается симметричная полупроводниковая гетероструктура GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb типа II. Именно наличие больших разрывов зон проводимости, величина которых более ширины запрещенной зоны активности области, оказывается наиболее важным для создания инфракрасных светодиодов, адаптированных с точки зрения практических спектральных приложений.

Таким образом, в настоящей работе сообщается о создании светодиодов для детектирования углеводородов C–H в области длин волн 2.3 μm . Исследования показали преимущества симметричного типа светодиодной гетероструктуры, построенной без гетероперехода II типа GaSb/GaInAsSb, поскольку излучение из них характеризуется большей спектральной плотностью мощности во всем диапазоне непрерывных токов накачки. Для комнатной температуры в области длин волн 2.3 μm достигнута максимальная непрерывная оптическая мощность 1.2 mW ($3.7 \cdot 10^{-13} \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz}$) и показана перспективность использования светодиодов для детектирования молекул углеводородов методами абсорбционной спектроскопии с использованием исследованных светодиодов.

Список литературы

- [1] Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H., Rinsland C.P., Smith M.A., Cris Benner D., Malathy-Devi V., Flaud J.-M., Camy-Peyret C., Goldman A., Massie S.T., Brown L.R., Toth R.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1992. V. 48. P. 469–507.
- [2] Mabbitt A., Parker A. // Sens. Rev. 1996. V. 16 (3). P. 38–41.
- [3] Андаспаева А.А., Баранов А.Н., Гусейнов А.А., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1990. Т. 24 (10). С. 1708–1714.
- [4] Андаспаева А.А., Баранов А.Н., Гусейнов А.А., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Сидоренкова Е.А., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 18. С. 71–75.
- [5] Андаспаева А.А., Именков А.Н., Колчанова Н.М., А.А. Попов, Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 24. С. 5–10.
- [6] Grebenyuk A.M., Litvak A.M., Popov A.A., Syavris S.V., Charykov N.A. // Journal of Appl. Chemistry (GB). 1991. V. 64 (12). Part 1. P. 2421–2426.
- [7] Колчанова Н.М., Попов А.А., Богословская А.Б., Сукач Г.А. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 21. С. 61–65.