

06.3;07;12

## Мощностные характеристики $2.2 \mu\text{m}$ светодиодов для спектральных приложений

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

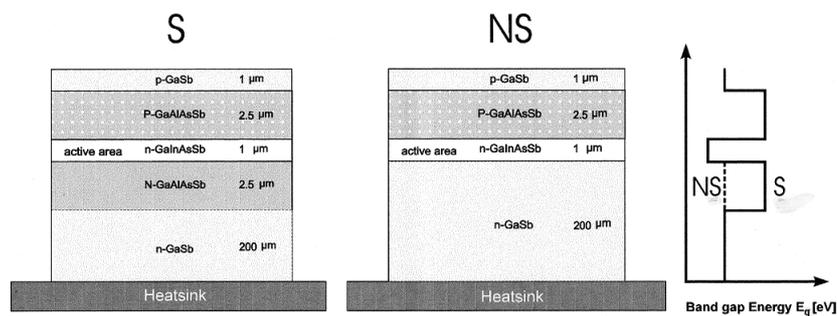
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 7 апреля 1997 г.

Приведены результаты исследования основных электрических и мощностных характеристик светодиодов спектральной области  $2.0\text{--}2.28 \mu\text{m}$ , предназначенных для спектральных измерений азотосодержащих молекул. Светодиоды, работающие при комнатной температуре в непрерывном режиме, создавались из двойной как симметричной, так и несимметричной гетероструктуры на основе твердых растворов GaInAsSb. Путем оптимизации конструкции достигнута непрерывная (CW) оптическая мощность светодиода  $\sim 1.7 \text{mW}$ .

Отличительной чертой спектрального диапазона  $2.0\text{--}2.8 \mu\text{m}$  является его привлекательность для создания портативных газоанализаторов, основанных на методах спектроскопии. Среди наиболее важных из них следует отметить анализаторы азотосодержащих молекул, таких как  $\text{N}_2\text{O}$  ( $2.11 \mu\text{m}$ ,  $2.26 \mu\text{m}$ ),  $\text{NO}_2$  ( $2.19 \mu\text{m}$ ), аммония  $\text{NH}_3$  ( $2.25 \mu\text{m}$ ) и т.д., линии поглощения которых лежат в области  $2.0\text{--}2.28 \mu\text{m}$  [1]. Источниками излучения в таких анализаторах могут быть полупроводниковые светодиоды, спектральная плотность мощности и квантовая эффективность которых превосходят аналогичные показатели тепловых источников излучения. Применение инфракрасных светодиодов позволяет создать компактные анализаторы, отличающиеся отсутствием дополнительных оптических фильтров и механических модуляторов.

Поскольку область излучения светодиодных гетероструктур на основе напряженных слоев соединений InGaAs/InP [2] ограничена длинами волн короче  $2 \mu\text{m}$ , наиболее перспективным материалом для светодиодов спектральной области  $2.0\text{--}2.28 \mu\text{m}$  являются твердые растворы GaInAsSb/GaSb [3]. Применение гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb уже позволило нам достичь квантовой эффективности излучательной рекомбинации до 4% при комнатной температу-



**Рис. 1.** Схема исследованных светодиодных двойных гетероструктур. Вывод излучения осуществлялся перпендикулярно подложке через широкозонные слои. Гетероструктура типа *S* отличалась от структуры типа *NS* отсутствием широкозонной области *N-GaAlAsSb*. В правой части представлена плоская энергетическая диаграмма гетероструктур, на которой пунктирной линией проиллюстрировано их отличие.

ре [4]. Данный спектральный диапазон был также перекрыт излучением перестраиваемого светодиода [5], однако достигнутая мощность излучения составила менее  $0.1\text{--}0.2\ \text{mW}$ . Представленное ниже исследование является продолжением наших работ в области инфракрасных полупроводниковых излучающих гетероструктур на основе GaSb.

В настоящей работе выполнено сравнительное исследование различных конструкций светодиодов для области длин волны  $2.2\ \mu\text{m}$ , различавшихся как величиной электронного ограничения, так и толщиной активной области. Это позволило создать светоизлучающие диоды, работающие при комнатной температуре в непрерывном (CW) режиме с повышенной спектральной плотностью оптической мощности.

Методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложке *n-GaSb* (100) были созданы двойные гетероструктуры двух типов (рис. 1). Гетероструктура первого типа (*S*) представляла собой симметричную гетероструктуру GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb. Структура состояла из четырех эпитаксиальных слоев. Активный слой *n-GaInAsSb* был заключен между двумя широкозонными эмиттерами *N-* и *P-GaAlAsSb* (толщиной  $2.5\ \mu\text{m}$ ). Узкозонный сильнолегированный слой *p-GaSb* (толщиной  $0.5\ \mu\text{m}$ ) наращивался сверху с целью создания низкоомно-

го контакта. Активный слой GaInAsSb характеризовался содержанием индия 0.16 ( $E_g = 0.57$  eV) и был легирован Te до концентрации  $(1-2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Широкозонные ограничивающие слои GaAlAsSb выращивались с содержанием Al-0.50 ( $E_g = 1.11$  eV) и легировались Te и Ge до концентрации  $(2-4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $(6-8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  для слоев *N*- и *P*-типа соответственно. Все слои были согласованы по периоду решетки с подложкой GaSb. Структура второго типа (NS) отличалась отсутствием слоя *N*-GaAlAsSb и была несимметричной двойной гетероструктурой. Технология эпитаксии гетероструктур на основе многокомпонентных твердых растворов GaSb сообщалась ранее [6].

Исследовались круглые мезадиоды, полученные с помощью фотолитографии и глубокого химического травления в подложку. Диаметр мезы ( $300 \mu\text{m}$ ) определял площадь излучающей поверхности ( $S = 7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ ). Кристалл одиночного светодиода имел размер квадрата  $500 \times 500 \mu\text{m}$ . Полупроводниковый кристалл монтировался на стандартный корпус ТО-18. На корпус ТО-18 монтировался параболический отражатель, что позволяло сколлимировать излучение светодиода в угле  $(10-12) \text{ grad}$ . Полные размеры светодиода с параболическим отражателем составляли 9 mm в диаметре и 5.5 mm в длину.

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

Вольт-амперные характеристики светодиодов имели диодный характер. Вольт-амперные характеристики двух типов структур отличались друг от друга напряжением отсечки, которое составляло 0.23 V для структуры NS и 0.27 V — для S структуры. Для обеих структур при прямом смещении последовательные сопротивления составляли  $\sim 1.3-1.4 \Omega$ , а вольт-амперные характеристики имели два участка с точкой перегиба, лежавшей в области токов 35 mA (напряжение  $U \sim 0.33-0.35$  V). В области малых смещений вольт-амперную характеристику можно описать формулой:  $I = I_0 \exp(eU/kT)$ , где  $e$  — заряд электрона,  $T$  — температура,  $I_0$  — ток насыщения, который составлял для структур S и NS соответственно 1.1 и 0.28  $\mu\text{A}$  для первого участка и 22 и 4.5  $\mu\text{A}$  для второго участка.

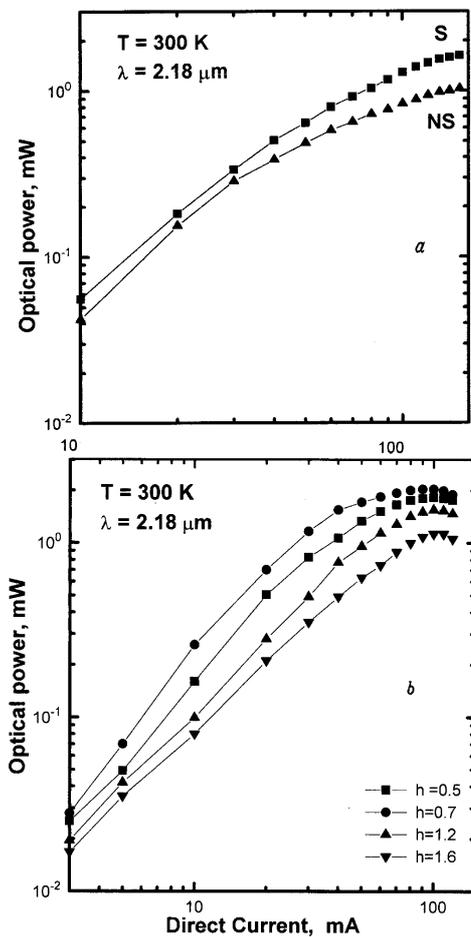
Спектральные и мощностные характеристики диодов тестировались в непрерывном (CW) режиме при комнатной температуре. Для обеих структур спектр спонтанного излучения имел типичный для инфракрас-

ных светодиодов температурно уширенный контур. Излучение наблюдалось при прямом смещении, когда амплитуда тока превышала 5 мА. Резкий подъем мощности наблюдался для токов инжекции выше 10 мА. Отметим лишь следующие наблюдавшиеся особенности спектров спонтанной рекомбинации.

Спектр симметричной структуры  $S$  состоял из одиночной полосы излучения с максимумом на длине волны  $\lambda = 2.173 \mu\text{m}$  при токе 120 мА, ширина спектра (FWHM) составляла  $0.23 \mu\text{m}$ . При охлаждении до температуры жидкого азота ( $T = 77 \text{ K}$ ) максимум смещался в коротковолновую сторону к  $\lambda = 1.989 \mu\text{m}$  со средней скоростью  $0.82 \text{ nm/K}$ . Ширина спектра излучения FWHM сужалась до  $0.07 \mu\text{m}$ . Следует отметить, что общий температурный сдвиг максимума  $\Delta h\nu(\Delta T)$  ( $0.53 \text{ meV}$ ) оказался на  $17 \text{ meV}$  меньше расчетного температурного уширения запрещенной зоны  $\Delta E_g(\Delta T)$  ( $70 \text{ meV}$ ).

Спектр излучения несимметричной структуры NS имел следующие отличия. При токе 120 мА максимум оказался смещен на  $20 \text{ nm}$  в длинноволновую сторону. Ширина спектра FWHM была уширена до  $0.28 \mu\text{m}$ . Смещение максимума к азотной температуре на  $-0.196 \mu\text{m}$  также оказалось меньше расчетной температурной зависимости  $E_g$  (на  $14 \text{ meV}$ ). Спектр излучения характеризовался большим уширением  $0.105 \mu\text{m}$  FWHM и при азотной температуре. Для обеих структур положение максимума излучения слабо зависело от величины инжектированного тока. Сдвиг наблюдался в длинноволновую сторону со средней скоростью  $0.05 \text{ nm/mA}$ .

Токовая зависимость выходной оптической мощности представлена на рис. 2. Оптическая мощность  $P$  нарастала во всем диапазоне токов для обеих гетероструктур и может быть описана степенной зависимостью  $P \sim I^n$ . Для симметричной структуры  $S$  на начальном участке до токов  $I = 90 \text{ mA}$   $P \sim I$  и насыщалась к  $P \sim I^{0.87}$  при больших значениях накачки. Для несимметричной структуры NS соответствующие значения  $n$  составляли порядка 0.93 и 0.76 для малых и больших токов соответственно. Зависимость характеризовалась большей выходной мощностью во всем диапазоне токов для светодиодов типа  $S$ . Максимальная непрерывная мощность  $1.7 \text{ mW}$  была достигнута при инжекционном токе 120 мА. При больших величинах непрерывного тока происходило насыщение ватт-амперной характеристики. Симметричные светодиодные гетероструктуры  $S$  были исследованы в зависимости от толщины активной области в интервале от  $0.5$  до  $1.6 \mu\text{m}$  (рис. 2,  $b$ ).



**Рис. 2.** Мощностные характеристики светодиодов. Зависимости получены при питании постоянным током и комнатной температуре. *a* — сравнение характеристик светодиодов на основе симметричной (*S*) (V22712) и несимметричной (*NS*) (V22707) двойных гетероструктур, отличающихся величиной  $N/n$  гетеробарьера. Толщина активной области обеих структур  $0.8\ \mu\text{m}$ . Для симметричной (*S*) структуры эмиттером служит  $N\text{-GaAlAsSb}$  (50% Al), для несимметричной (*NS*) —  $N\text{-GaSb}$  (0% Al). *b* — оптимизация выходной оптической мощности в зависимости от толщины активной области.

Максимальная оптическая мощность достигалась при толщинах активной области порядка  $0.7\ \mu\text{m}$ . Увеличение и уменьшение толщины приводило к падению выходной мощности. Отметим, что оптимальная толщина оказалась значительно меньше диффузионной длины ( $\sim 2\ \mu\text{m}$ ) для носителей в твердых растворах GaInAsSb.

Приведенные характеристики показывают зависимость спектральных и мощностных характеристик светодиодных двойных гетероструктур на основе узкозонных соединений GaInAsSb от  $N$ -эмиттера. Пониженное значение наклона мощностной зависимости ( $n < 1$ ) свидетельствует о наличии безызлучательных потерь, обусловленных как утечкой носителей через гетеробарьер, так и наличием механизма, конкурирующего с рекомбинацией в объеме активной области. В частности, это связано с утечкой носителей заряда через гетеробарьеры, особенно существенной для дырок в структуре типа  $NS$ . Слабая температурная зависимость энергии максимума излучательной рекомбинации характерна для туннельной излучательной рекомбинации. Ее наличие совместно с рекомбинацией в объеме активной области может приводить к уширению спектра излучения, наблюдавшемуся в несимметричной структуре, поскольку уменьшение высоты  $N$ -эмиттера приводит к увеличению времени рекомбинации вблизи интерфейса пропорционально  $\tau \sim (\Delta E_c)^{-1/2}$  [3]. Увеличение напряжения, прикладываемого к структуре, приводит к спрямлению изгибов зон на  $N-n$  переходе и отвечает изменению крутизны для несимметричной структуры  $NS$  при меньших токах. Смена линейной токовой зависимости ( $n \sim 1$ ) на сублинейную ( $n < 1$ ) может быть связана с активацией безызлучательной рекомбинации. Следует отметить, однако, что ее коэффициент оказывается меньше коэффициента, соответствующего объемной Оже-рекомбинации ( $n \sim 2/3$ ), что свидетельствует об ослаблении этого канала безызлучательных потерь в исследованных симметричных структурах. Заметим, что в целом спектральные и электрические характеристики таких структур соответствуют рекомбинации в прилегающем к гетерогранице объеме активной области. Однако по спектральным и мощностным отличиям симметричная полупроводниковая гетероструктура GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, характеризующаяся наличием больших разрывов зон проводимости, величина которых сравнима с шириной запрещенной зоны активной области, оказывается наиболее привлекательной для достижения максимальной спектральной плотности мощности. Именно этот параметр

оказался исключительно важным для практических приложений данного класса инфракрасных светодиодов в спектроскопии.

Таким образом, в настоящей работе сообщается о создании светодиодов для детектирования азотосодержащих молекул в области длин волн 2.0–2.28  $\mu\text{m}$ . Исследования показали преимущества симметричного типа светодиодной гетероструктуры, который характеризовался большей оптической мощностью и меньшей шириной спектра излучения во всем диапазоне непрерывных токов накачки. Для комнатной температуры в области длин волн 2.2  $\mu\text{m}$  на основе двойных приложений к азотосодержащим молекулам приведены основные электрические и излучательные характеристики светодиодов.

## Список литературы

- [1] Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Chris 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] Murti M.R., Grietens B., Van Hoof C., Borghs G.J. // *J. Appl. Phys.* 1995. V. 78. N 1. P. 578–580.
- [3] Andaspaeva A.A., Baranov A.N., Guseinov A.A., Imenkov A.N., Kolchanova N.M., Yakovlev Yu.P. // *Semiconductors*. 1990. V. 24. N 10. P. 1708–1714.
- [4] Andaspaeva A.A., Baranov A.N., Guseinov A.A., Imenkov A.N., Litvak A.M., Filaretova G.M., Yakovlev Yu.P. // *Sov. Tech. Phys. Lett.* 1988. V. 14. N 9. P. 845–849.
- [5] Popov A. // *Tech. Phys. Lett.* 1994. V. 20. N 11. P. 845–846.
- [6] Grabenyuk 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.