

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 N_2O ($2.11 \mu\text{m}$, $2.26 \mu\text{m}$), NO_2 ($2.19 \mu\text{m}$), аммония 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-

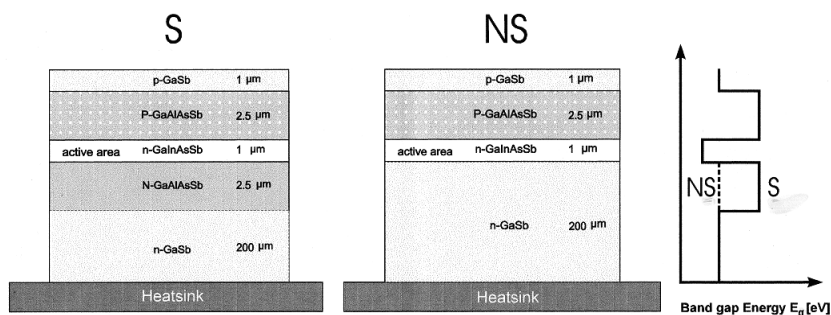


Рис. 1. Схема исследованных светодиодных двойных гетероструктур. Вывод излучения осуществлялся перпендикулярно подложке через широкозонные слои. Гетероструктура типа *S* отличалась от структуры типа *NS* отсутствием широкозонной области *N-GaAlAsSb*. В правой части представлена плоская энергетическая 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 ($E_g = 0.57 \text{ eV}$) и был легирован Te до концентрации $(1-2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Широкозонные ограничивающие слои GaAlAsSb выращивались с содержанием Al-0.50 ($E_g = 1.11 \text{ eV}$) 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 $U \sim 0.33-0.35 \text{ V}$). 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).

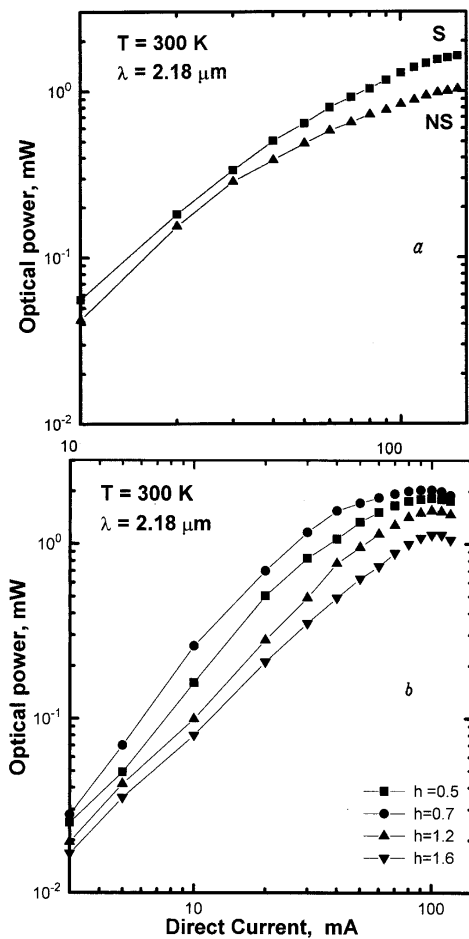


Рис. 2. Мощностные характеристики светодиодов. Зависимости получены при питании постоянным током и комнатной температуре. *a* — сравнение характеристик светодиодов на основе симметричной (*S*) (V22712) и несимметричной (*NS*) (V22707) двойных гетероструктур, отличающихся величиной N/n гетеробарьера. 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 μm . 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 μm 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.