

Широкополосные суперлюминесцентные диоды ближнего ИК диапазона спектра на основе двуслойных квантоворазмерных гетероструктур

Е.В.Андреева, Н.А.Волков, Ю.О.Костин, П.И.Лапин,
А.А.Мармалюк, Д.Р.Сабитов, С.Д.Якубович

Экспериментально исследованы суперлюминесцентные диоды (СЛД) со спектром излучения в полосе 800–900 нм, созданные на основе двуслойных квантоворазмерных гетероструктур (КРС) в системе (AlGa)As/GaAs. Показано, что эти СЛД позволяют получить достаточно высокую мощность выходного излучения с шириной спектра более 55 нм при значительно меньших длинах активного канала, чем у СЛД на основе аналогичных однослойных КРС. Несмотря на повышенную плотность рабочего тока инжекции, срок службы исследованных СЛД превышает 10000 ч.

Ключевые слова: суперлюминесцентный диод, квантоворазмерные гетероструктуры.

1. Введение

Последнее десятилетие ознаменовалось бурным развитием оптической когерентной томографии (ОКТ) [1]. Эта технология, которую иногда называют оптической биопсией, позволяет бесконтактно и практически мгновенно получать *in vivo* двумерные или трехмерные изображения биологических тканей. В большинстве систем ОКТ в качестве источников излучения используются суперлюминесцентные диоды (СЛД), обеспечивающие достаточно широкую спектральную полосу (низкую когерентность) и высокую яркость излучения, обладая при этом миниатюрными размерами и высокой эффективностью. Среди многочисленных применений в медицине и биологии наиболее широкое распространение ОКТ-системы получили в офтальмологии [2]. Диагностические аппараты серии Stratus ОСТ, серийно выпускаемые уже несколько лет фирмой Carl Zeiss Meditec (реализовано более 6 000 приборов), успешно применяются в офтальмологических клиниках и медицинских центрах по всему миру. В этих аппаратах используются СЛД-модули ближнего ИК диапазона со спектральной полушириной линии излучения $\Delta\lambda = 22 - 25$ нм, что позволяет реализовать аксиальное разрешение около 10 мкм. Наряду с этим, в десятках фирм и лабораторий ведется разработка аналогичной аппаратуры с повышенным пространственным разрешением, для чего требуются более широкополосные СЛД. В прошлом году фирмы Optopol Technology, Topcon Medical Systems и Optovue начали серийный выпуск офтальмологических ОКТ-систем следующего поколения. В них используются светоизлучающие модули серии SLD-37 с $\Delta\lambda = 45 - 55$ нм [3], что обеспечивает двукратный выигрыш в пространственном разрешении.

СЛД этой серии изготавливаются из однослойных КРС (ОКРС) в системе (AlGa)As/GaAs [4, 5]. Максимум спектральной ширины (минимум длины когерентности) излучения таких СЛД достигается в рабочих условиях, при которых интенсивности квантовых переходов из основного и первого возбужденного состояний выравниваются. При этом спектр излучения приобретает характерную двугорбую форму. Глубина провала между спектральными максимумами является весьма критичным параметром. Для практических применений в ОКТ обычно требуется, чтобы указанная величина не превышала 2.0 дБ (37%). Выполнить это требование зачастую очень сложно, особенно для СЛД повышенной мощности.

Известно, что спектр суперлюминесценции может быть сглажен за счет использования многослойных КРС. При этом, однако, резко возрастает суммарный объем активной области СЛД, и для достижения максимальной ширины спектра излучения требуется значительное увеличение плотности тока инжекции, что может неблагоприятно сказаться на надежности приборов. В настоящей работе, целью которой являлось дальнейшее совершенствование спектральных характеристик приборов серии SLD-37, проведено исследование СЛД на основе двуслойных КРС (ДКРС) в той же системе (AlGa)As/GaAs. Особое внимание было уделено ресурсным испытаниям экспериментальных образцов.

2. Экспериментальные образцы

Полупроводниковые квантоворазмерные гетероструктуры (AlGa)As/GaAs были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии. Рост осуществлялся в горизонтальном кварцевом реакторе «СИГМОС-130» с вращающимся графитовым подложкодержателем. Температура роста составляла 770 °С при давлении в реакторе 60 Тор. В качестве источников элементов III и V групп использовались $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$, $\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ и AsH_3 . Соединения $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ и SiH_4 использовались в качестве лигатуры р- и n-типа проводимости, газом-носителем служил водород. Эпитаксиальный рост проводился на подложках n-GaAs (100).

Схематическое изображение зонной диаграммы выращенных гетероструктур представлено на рис.1. Глав-

Е.В.Андреева, Н.А.Волков, Ю.О.Костин, П.И.Лапин. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, п/я 70
А.А.Мармалюк, Д.Р.Сабитов. «НИИ "Полос" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3
С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78;
e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

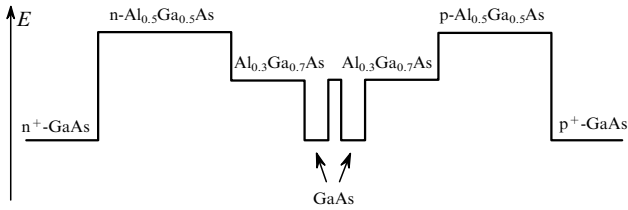


Рис.1. Схематическая зонная диаграмма ДКРС на основе (AlGa)As/GaAs.

ное отличие этих двусторонних гетероструктур с раздельным ограничением от структур, описанных в [5], состояло в том, что их активные области содержали по две разделенные (AlGa)As-барьером квантовые ямы. Для получения широкого спектра излучения геометрия квантовых ям и толщина барьера между ними подбирались таким образом, чтобы обеспечить взаимодействие волновых функций электронов в соседних ямах и добиться расщепления энергетических уровней. Были использованы два типа ДКРС, отличающиеся шириной квантовых ям. У структур типа I эта величина была на 25 % больше, чем у структур типа II. Активная область располагалась между волноводными слоями $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ толщиной 0.15 мкм и эмиттерными слоями $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ толщиной 1.5 мкм. Верхний контактный слой p^+-GaAs имел толщину 0.5 мкм.

Конструкция образцов СЛД была традиционной. Их активный канал представлял собой прямой гребневидный волновод шириной 4.0 мкм с наклоном оси 7° относительно нормали к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены просветляющие покрытия. Длина

активного канала могла варьироваться в широких пределах с шагом 100 мкм. Все измерения проводились в непрерывном режиме инжекции при температуре $25^\circ C$.

3. Результаты экспериментов

На рис.2 представлены типичные ватт-амперные характеристики СЛД на основе ДКРС с длинами активных каналов L_a от 400 до 800 мкм. Точками на кривых отмечены рабочие режимы, соответствующие выравненным спектральным максимумам. СЛД с большими L_a обладали более высокой внешней квантовой эффективностью, однако в их излучении при любых разумных токах инжекции доминировали квантовые переходы из основного состояния, вследствие чего их спектральная полуширина $\Delta\lambda$ не превышала 30 нм. В рамках данной работы эти образцы не исследовались. Из сравнения приведенных кривых видно, что у СЛД на основе ДКРС типа II максимум $\Delta\lambda$ достигается при больших плотностях тока инжекции. Это связано с тем, что с уменьшением ширины квантовой ямы возрастает энергетический зазор между основным и первым возбужденным состояниями.

На рис.3 изображены спектры излучения и автокорреляционные функции интенсивности (АКФ) для двух образцов СЛД на основе ДКРС различных типов. Заметное уширение спектра при одновременном уменьшении глубины спектрального провала у образцов типа II представляет большой практический интерес. Сужение центрального пика АКФ и уменьшение высоты его «пьедала» позволяют повысить разрешение и чувствительность систем ОКТ.

В табл.1 представлены основные физические характеристики исследованных образцов СЛД. Для сравнения в первой строке указаны диапазоны значений параметров СЛД на основе вышеупомянутой ОКРС. Как и ожидалось, у исследованных образцов максимум $\Delta\lambda$ при требуемых уровнях выходной мощности достигается при меньших длинах L_a и больших плотностях тока инжекции j . Хорошо известно, что скорость старения полупроводниковых лазеров в ходе работы может сильно зависеть от величины j . В рамках настоящей работы предварительным ресурсным испытаниям были подвергнуты четыре партии образцов СЛД: типа I с $L_a = 600$ и 700 мкм и типа II с $L_a = 400$ и 500 мкм. Соответствующие зависимости изображены на рис.4. Образцы типа I успешно прошли испытания. Экстраполяция полученных временных зависимостей P_{fs} (рис.4,а,б) показывает, что их средний срок службы превышает 20000 ч ($L_a = 600$ мкм) и 15000 ч ($L_a = 700$ мкм). К сожалению, образцы типа II,

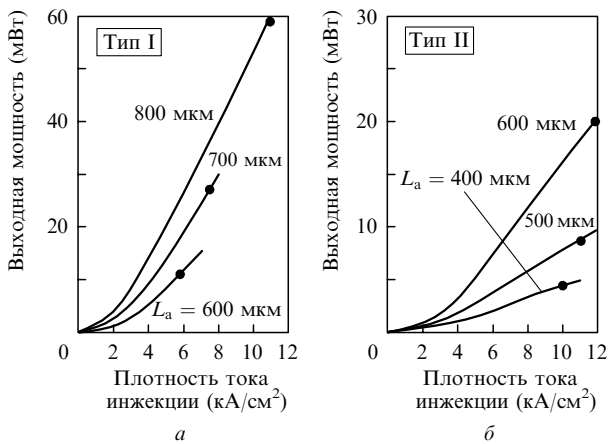


Рис.2. Ватт-амперные характеристики образцов СЛД на основе ДКРС типов I (а) и II (б) с различными длинами активных каналов.

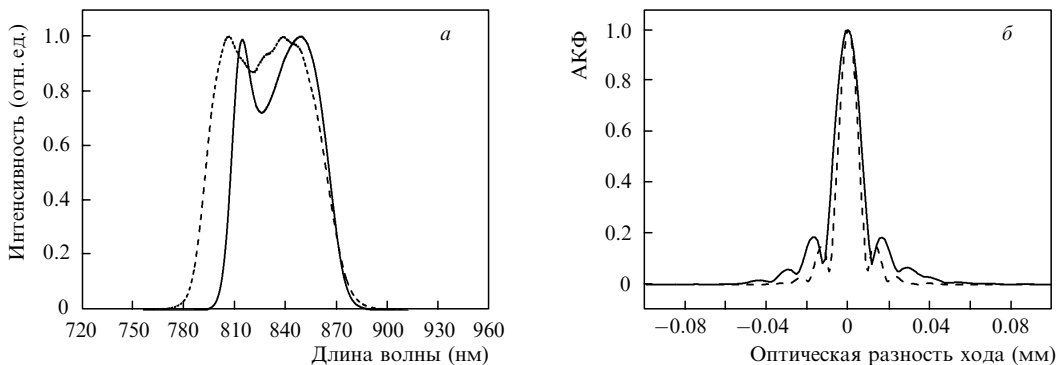


Рис.3. Спектр (а) и центральный пик АКФ (б) излучения СЛД на основе ДКРС типа I с $L_a = 600$ мкм (сплошные кривые) и типа II с $L_a = 400$ мкм (штриховые кривые).

Табл.1. Характеристики СЛД с различными длинами активных каналов при максимальной ширине спектра излучения.

Тип ДГС	L_a (мкм)	I (мА)	j (кА/см ²)	P_{fs} (мВт)	P_{sm} (мВт)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	L_c (мкм)	ΔS (%)
ОКРС	1200–1600	140–250	3.0–4.0	2.0–50.0	1.0–25.0	835–850	45.0–55.0	12.5–16.0	10.0–37.0
ДКРС Тип I	600	140	5.8	11.0	5.5	838	56.0	12.5	26.0
	700	210	7.5	28.0	14.5	839	55.0	12.8	27.0
	800	350	10.9	60.0	32.0	840	54.0	13.0	28.0
ДКРС Тип II	400	160	10.0	4.5	1.7	829	72.5	9.5	15.0
	500	220	11.0	9.0	4.0	831	70.0	9.9	18.0
	600	285	11.8	20.5	10.0	835	65.0	10.7	26.0

Примечание: I – ток инжекции; j – плотность тока инжекции; P_{fs} – выходная мощность в открытое пространство; P_{sm} – выходная мощность через одномодовый волоконный световод; λ_m – медианная длина волны; L_c – длина когерентности; ΔS – глубина спектрального провала.

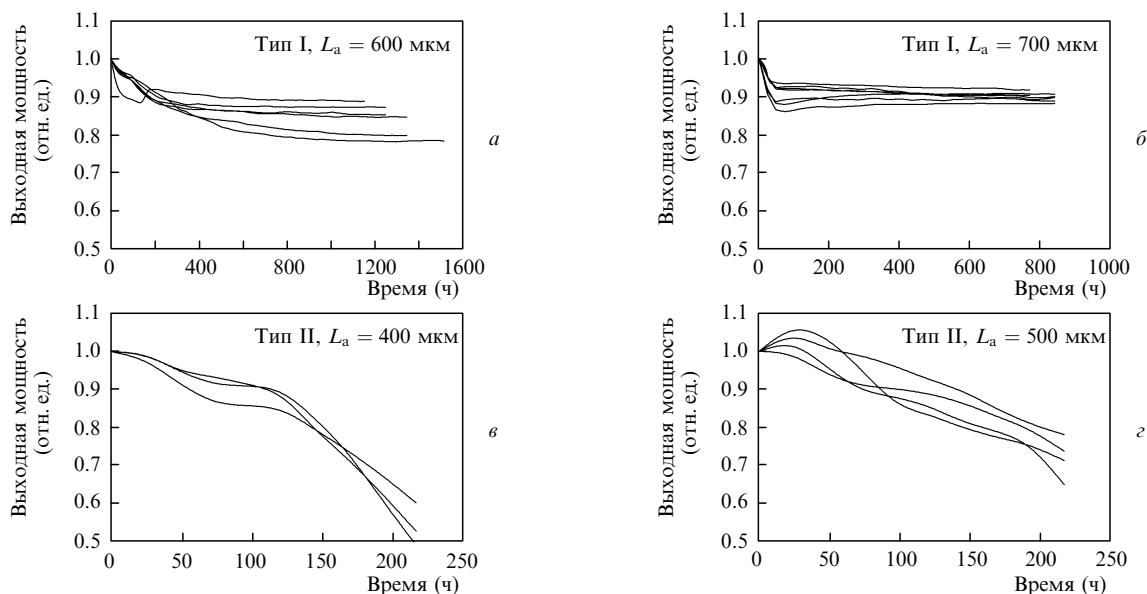


Рис.4. Хронограммы ресурсных испытаний СЛД на основе ДКРС типов I и II с различными длинами активного канала.

обладающие рекордными спектральными характеристиками для СЛД данного диапазона спектра, оказались склонными к быстрому старению и деградировали (спад P_{fs} на 50 %) в течение 200 ч (рис.4,в,г). СЛД со столь малым сроком службы могут быть использованы в лабораторных экспериментах, однако для серийно выпускаемых светоизлучающих модулей они непригодны. Для выяснения причин их ускоренного старения требуются дополнительные исследования. Очевидно, что оно было стимулировано повышенной плотностью рабочего тока, хотя сама по себе величина $j = 10^4$ А/см² не является запредельной. Современные мощные лазерные диоды (ЛД) на основе подобных гетероструктур надежно работают в непрерывном режиме и при больших плотностях тока, к тому же лучевые нагрузки на торцевые грани кристалла в этих ЛД намного выше, чем в СЛД. С достаточной уверенностью можно утверждать, что дальнейшее совершенствование процессов роста и последующей обработки гетероэпитаксиальных пластин типа II позволит реализовать СЛД с продемонстрированными выходными характеристиками и приемлемым сроком службы.

СЛД типа I с $L_a = 800$ мкм обладают выходной мощностью, избыточной для офтальмологических ОКТ-систем, но для некоторых других приложений они представляют несомненный интерес. В частности, они могут быть эффективно использованы в комбинированных источниках света серии BroadLighter [6]. В настоящее время эти СЛД проходят предварительные ресурсные испытания.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что использование ДКРС позволяет улучшить спектральные характеристики широкополосных СЛД ИК диапазона 800–900 нм. Несмотря на повышенную плотность рабочего тока инжекции, эти СЛД могут обладать приемлемым сроком службы. То, что требуемые выходные параметры реализуются при меньших длинах активных каналов, заметно увеличивает количество СЛД, изготавливаемых из гетероэпитаксиальной пластины единичной площади. Последнее обстоятельство весьма существенно при серийном выпуске приборов.

Авторы признательны А.Т.Семенову за внимание к проведенным исследованиям. Работа частично поддержана Минобрнауки РФ (проект РНП 2.1.1.1094).

1. Fujimoto G. *Nature Biotechnol.*, **21**, 1361 (2003).
2. Chen R.W.S., Ducker J.S., Shrinivasan V., Fujimoto J.G. *Rev. Ophthalmol.*, July, 84 (2007).
3. Андреева Е.В., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **37** (5), 443 (2007).
4. Semenov A.T., Batovrin V.K., Garmash I.A., Shidlovski V.R., Shramenko M.V., Yakubovich S.D. *Electron. Lett.*, **31** (4), 314 (1995).
5. Батоврин В.К., Гармаш И.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Любарский А.В., Плявенок А.Г., Сафин С.А., Семенов А.Т., Шидловский В.Р., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996).
6. Войтковский М., Лапин П.И., Мамедов Д.С., Фуджимото Дж.Дж., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **35** (7), 667 (2005).