

Мощные и широкополосные суперлюминесцентные диоды спектрального диапазона 1000–1100 нм

П.И.Лапин, Д.С.Мамедов, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, С.Д.Якубович

Исследованы физические характеристики суперлюминесцентных диодов (СЛД) на основе квантоворазмерной гетероструктуры (КРС) с двумя активными (InGa)As-слоями. В зависимости от длины активного канала СЛД в режиме пространственно однородной инжекции выходная мощность излучения на выходе пристыкованного одномодового волоконного световода составляла 0.5–30 мВт при ширине спектра излучения от 30 до 120 нм. Использование таких СЛД в комбинированных широкополосных источниках излучения серии BroadLighter позволит перекрыть ближний ИК диапазон спектра 800–1100 нм.

Ключевые слова: суперлюминесцентный диод, квантоворазмерная гетероструктура, оптическая когерентная томография.

1. Введение

В последнее десятилетие успешно развивается новый метод медицинской диагностики – оптическая когерентная томография (ОКТ) [1]. Основными требованиями, предъявляемыми к источникам оптического излучения для ОКТ, являются высокая яркость, которая обеспечивает достаточно глубокое проникновение излучения в анализируемые ткани и позволяет использовать одномодовые оптоволоконные интерферометрические схемы, а также низкая степень когерентности, определяющая пространственное разрешение метода. Наиболее широкое распространение системы ОКТ получили в офтальмологии. При этом в указанных системах до последнего времени чаще всего использовались широкополосные источники излучения ближнего ИК диапазона спектра 800–950 нм. Это связано с соответствующим окном прозрачности глазной жидкости [2]. Однако с недавних пор большое внимание уделяется и спектральному диапазону 1000–1100 нм [3]. В работе [4] показано, что из-за ослабления оптического рассеяния в глазной сетчатке и значительного увеличения безопасной для глаза экспозиции указанный спектральный диапазон является предпочтительным для некоторых типов офтальмологических систем ОКТ.

В соответствующих офтальмологических исследованиях применяются как источники излучения на основе волоконных усилителей, активированных иттербием (YDFA), – лазеры со свипированием длины волны или источники усиленного спонтанного излучения, так и

суперлюминесцентные диоды (СЛД). Преимущества последних общеизвестны, но, к сожалению, существующие серийные СЛД данного спектрального диапазона значительно уступают иттербиевым волоконным излучателям по выходной мощности. Например, мощность на выходе пристыкованного одномодового волоконного световода СЛД-модуля SLD-481-MP (длина волны 1045 нм, полуширина спектра излучения 40–45 нм) не превышает 2.0 мВт. В настоящей работе исследованы СЛД на основе двухслойной квантоворазмерной гетероструктуры (КРС) в системе (InGa)As/(AlGa)As, оптимизированной с целью повышения выходной мощности и уширения спектра излучения.

2. Экспериментальные образцы

Полупроводниковая гетероструктура (InGa)As/(AlGa)As была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии. Рост осуществлялся в горизонтальном кварцевом реакторе «СИГМОС-130» с вращающимся графитовым подложкодержателем. Температура роста составляла 720 °С при давлении в реакторе 60 Тор. В качестве источников элементов III и V групп использовались Al(CH₃)₃, Ga(C₂H₅)₃, In(CH₃)₃ и AsH₃, соединения Zn(C₂H₅)₂ и SiH₄ служили лигатурами р- и п-типов проводимости соответственно, а газом-носителем был водород. Эпитаксиальный рост проводился на подложках n-GaAs (100).

Схематическое изображение зонной диаграммы выращенной гетероструктуры представлено на рис.1. Активная область гетероструктуры состояла из двух квантовых ям InGaAs, разделенных барьером GaAs. Геометрия квантовых ям подбиралась таким образом, чтобы обеспечить получение широкого спектра излучения. Активная область помещалась между волноводными слоями Al_{0.2}Ga_{0.8}As толщиной 0.15 мкм и эмиттерными слоями Al_{0.3}Ga_{0.7}As толщиной 1.5 мкм. Гетероструктура заканчивалась контактным слоем p⁺-GaAs толщиной 0.5 мкм.

Для исследований были изготовлены образцы СЛД с

П.И.Лапин, Д.С.Мамедов. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, п/я 70

А.А.Мармалюк, А.А.Падалица. ООО «Сигма плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 117454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 24 января 2006 г.

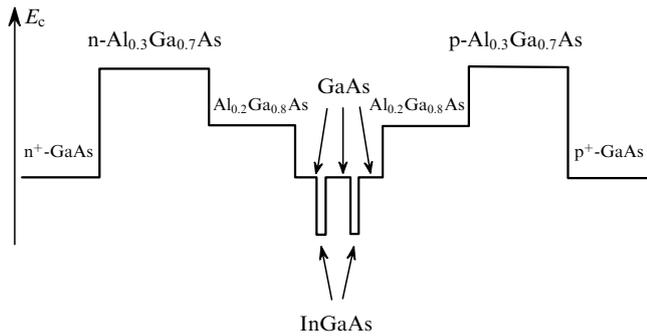


Рис.1. Схематическое изображение структуры слоев и зонная диаграмма двухслойной КРС.

наклонным расположением активного канала, подобные описанным в [5]. Боковое оптическое ограничение обеспечивалось сформированным гребнем шириной $w = 4$ мкм. Длина активного канала СЛД L_a могла варьироваться от 200 до 1600 мкм в зависимости от местоположения сколов, образующих торцевые грани кристалла. Для подавления положительной обратной связи по излучению ось активного канала располагалась под углом 7° по отношению к нормали к торцевым граням кристалла; кроме того, на эти грани наносились многослойные антиотражающие покрытия из чередующихся слоёв Al_2O_3 и ZrO_2 . Кристаллы напайвались на медный теплопровод р-стороной вверх. Все измерения проводились в режиме непрерывной пространственно однородной инжекции в условиях термостабилизации СЛД.

3. Спектральные и мощностные характеристики исследованных СЛД

Как известно, спектральные зависимости СЛД на основе КРС намного сложнее, чем в случае «объёмных» ДГС и ДГС с раздельным ограничением носителей [5, 6]. Они определяются перекрытием спектров спонтанного испускания и оптического усиления и зависят от многих факторов – плотности тока инжекции, её пространственной неоднородности (если таковая имеется), длины активного канала, температуры.

У исследованных СЛД спектральные максимумы располагались в областях 970–980 нм и 1020–1030 нм. Типичная эволюция спектра суперлюминесценции с ростом тока инжекции изображена на рис.2,а. Максималь-

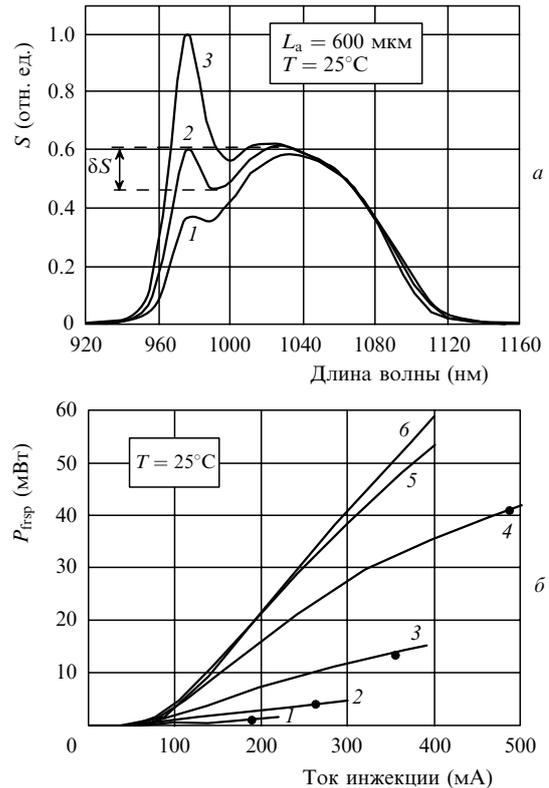


Рис.2. Спектры выходного излучения СЛД с $L_a = 600$ мкм при токах инжекции $I = 170$ (1), 192 (2), 220 мА (3) (а) и ватт-амперные характеристики СЛД с длиной активного канала $L_a = 600$ (1), 800 (2), 1000 (3), 1200 (4), 1400 (5) и 1600 мкм (б).

ная ширина спектра $\Delta\lambda$, соответствующая минимальной длине когерентности L_{coh} , достигается при выравнивании спектральных максимумов излучения (кривая 2). У СЛД с различными L_a это достигается при различных токах инжекции I и различных уровнях выходной мощности P_{out} . Это иллюстрируется семейством ватт-амперных характеристик (рис.2,б), где отмечены рабочие точки, соответствующие максимумам $\Delta\lambda$. При $L_a \geq 1200$ мкм нам не удалось добиться выравнивания спектральных максимумов.

Основные мощностные, спектральные и поляризационные характеристики исследованных СЛД в режиме максимальной ширины спектра при двух рабочих температурах ($T = 25$ и $15^\circ C$) сведены в табл.1.

Табл.1. Физические параметры СЛД с различной длиной активного канала L_a при максимальной ширине спектра излучения.

L_a (мкм)	T ($^\circ C$)	I (мА)	J (кА/см ²)	P_{fisp} (мВт)	P_{sm} (мВт)	K_{in} (%)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	δS (%)	TE/TM	L_{coh} (мкм)
600	25	192.0	8.0	1.20	0.36	30	1027.6	120.5	24	48	8.76
	15	188	7.83	1.45	0.44	30.3	1023.3	118.5	26	53	8.84
800	25	264	8.25	4.4	1.55	35.2	1027.3	114.5	30	96	9.22
	15	256	8.0	5.8	2.05	35.3	1022.8	112.5	33	97	9.30
1000	25	355	8.88	13.8	5.55	40.2	1029.5	111.5	36	140	9.51
	15	357	8.93	19.4	8.0	41.2	1025.1	109.5	39	155	9.60
1200	25	490	10.21	42.1	18.3	43.5	1029.6	108.5	37	200	9.77
	15	529	11.02	57.4	25.3	44.1	1022.5	107.5	40	215	9.73

Примечание: J – плотность тока инжекции; P_{fisp} – выходная мощность излучения в свободное пространство; P_{sm} – мощность излучения на выходе одномодового волоконного световода (нами использовалось оптимальное для данного спектрального диапазона одномодовое волокно Corning Pure Mode 720 с широкоапертурной сферической микролинзой на входном торце); K_{in} – коэффициент ввода излучения в волокно; δS – величина спектрального провала (рис.2,а); TE/TM – поляризационное отношение.

Проведённые измерения позволяют сделать следующие выводы:

- с увеличением L_a можно получить значительный выигрыш в выходной мощности излучения при слабом уменьшении $\Delta\lambda$ и незначительном увеличении δS , но при существенном росте рабочих токов;
- выходная мощность излучения заметно возрастает с понижением рабочей температуры;
- с ростом выходной мощности излучения растёт коэффициент ввода K_{in} , что связано с уменьшением доли спонтанного излучения в выходном световом потоке;
- излучение сильно поляризовано, причём степень поляризации заметно растёт с увеличением выходной мощности, что также связано с уменьшением доли спонтанного излучения.

На рис.3 представлена типичная для данных СЛД автокорреляционная функция (АКФ), зарегистрированная с помощью оптического анализатора ADVANTEST Q8347 на основе интерферометра Майкельсона. У АКФ наблюдается сложный центральный «пьедестал», что характерно для спектральных линий с формой, сильно отличающейся от гауссовой. Однако наличие узкого центрального пика позволяет рассчитывать на эффективное использование данных СЛД в системах ОКТ с высоким пространственным разрешением.

В ходе проведённых исследований не было отмечено сколько-нибудь заметной деградации выходных характеристик СЛД. Следует ожидать, что образцы с большей выходной мощностью и большим рабочим током будут обладать меньшим ресурсом, что потребует поиска компромисса между выходными характеристиками и предполагаемым сроком службы. Начаты исследования про-

цесса старения СЛД данного типа, требующие продолжительного времени.

4. Заключение

Следует отметить, что по достигнутым значениям ширины спектра излучения и выходной мощности исследованные в данной работе СЛД значительно превосходят как серийно выпускаемые СЛД данного спектрального диапазона, так и лабораторные образцы с рекордными значениями указанных параметров. Кроме того, данная конструкция СЛД (без оптического поглотителя) позволяет использовать их в качестве широкополосных лазерных усилителей бегущей волны.

Применение разработанных СЛД в широкополосных источниках света серии BroadLighter весьма перспективно. Подобные источники основаны на суперпозиции излучения нескольких СЛД, обладающих частично перекрывающимися спектрами, с использованием специальных широкополосных волоконно-оптических объединителей [2]. На рис.4 представлены спектры излучения подобных комбинированных источников, где в качестве наиболее длинноволнового излучателя использованы описанные в данной работе СЛД. Спектр двухканального комбинированного источника света (рис.4,а) получен при использовании описанных ранее квантоворазмерных СЛД, излучающих в спектральной области 920 нм [5]. Медианная длина волны такого двухканального источника составляет 980 нм при ширине спектра излучения порядка 210 нм (длина когерентности равна 4.6 мкм). Кроме того, на основе серийно выпускаемого прибора BroadLighter T-870 возможно создание четырехканаль-

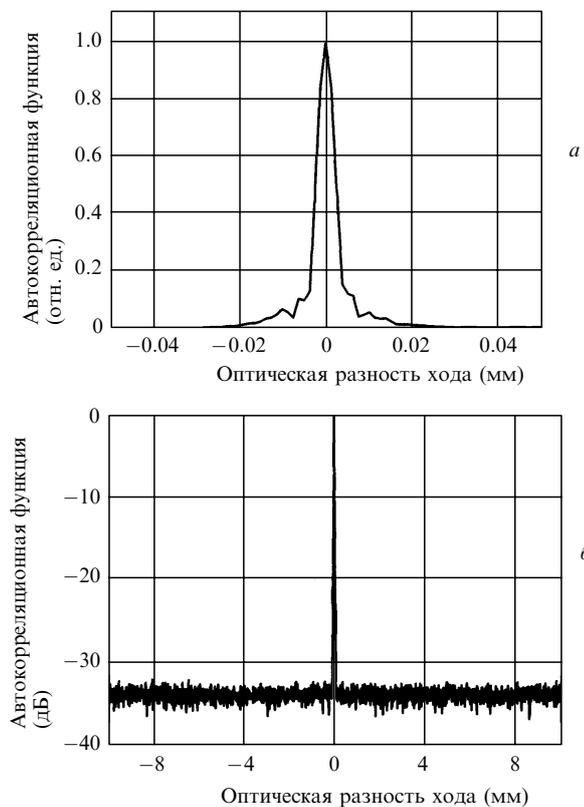


Рис.3. Автокорреляционная функция интенсивности СЛД ($L_a = 600$ мкм, $I = 190$ мА): центральный пик (а) и панорамная АКФ (б) ($T = 25^\circ\text{C}$).

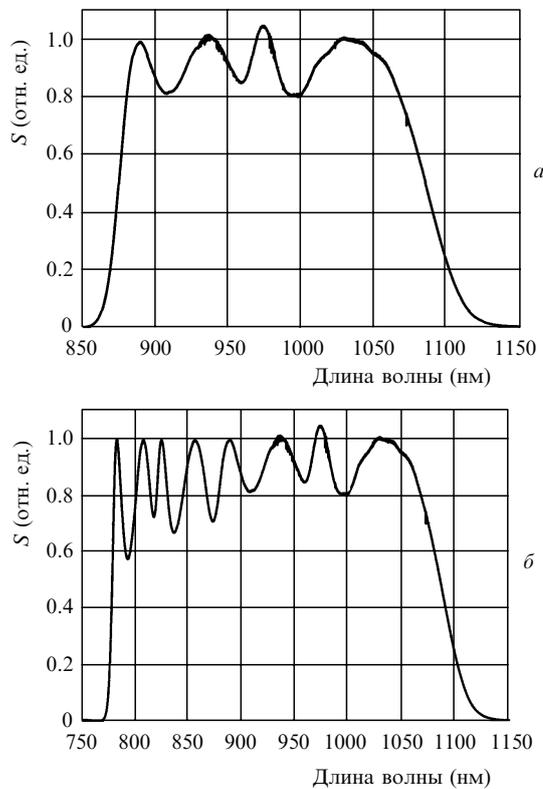


Рис.4. Спектры излучения многоканальных комбинированных источников излучения с использованием исследованных СЛД: двухканальный (а) и четырехканальный (б) комбинированные источники излучения.

ного комбинированного источника света с рекордной спектральной шириной, превышающей 300 нм, и медианной длиной волны в области 930 нм (длина когерентности 2.9 мкм). Спектр излучения такого прибора представлен на рис.4,б. Стоит отметить, что по совокупности выходных характеристик, как мощностных, так и спектральных, эти приборы не имеют аналогов среди полупроводниковых источников излучения.

Авторы благодарят А.Т.Семёнова за внимание к данной работе. Работа частично поддержана грантом МНТЦ № 2651р.

1. Fercher A.F., Drexler W., Hitzinger C.K., Lasser T. *Rep. Prog. Phys.*, **66**, 239 (2003).
2. Адлер Д.С., Ко Т.Х., Конорев А.К., Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Фуджимото Дж.Дж., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **34** (10), 915 (2004).
3. Povazay B., Bizheva K., Herman B., Unterhuber A., Sattmann H., Fercher A.F., Shubert C., Ahnelt P.K., Mei M., Holzwarth R., Wardworth W.J., Knight J.C., Russel P.St.J. *Opt. Express*, **11**, 1980 (2003).
4. Unterhuber A., Povazay B., Herman B., Sattmann H., Shavez-Pirson A., Drexler W. *Opt. Express*, **13**, 3252 (2005).
5. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **33** (6), 471 (2003).
6. Батоврин В.К., Гармаш И.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Любарский А.В., Плявенек А.Г., Сафин С.А., Семёнов А.Т., Шидловский В.Р., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996).