

Суперлюминесцентные диоды «ближайшего» ИК диапазона с шириной спектра 100 нм

С.Н.Ильченко, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, С.Д.Якубович

Экспериментально исследованы квантоворазмерные суперлюминесцентные диоды с экстремально тонким активным слоем состава (InGa)As. В непрерывном режиме инжекции выходная мощность таких диодов составляет единицы милливатт при центральной длине волны 830 нм и ширине спектра около 100 нм.

Ключевые слова: суперлюминесцентный диод, оптическая когерентная томография.

1. Введение

Вскоре после создания лазерных квантоворазмерных полупроводниковых гетероструктур (наногетероструктур) было показано, что ширина полосы их оптического усиления может достигать ~ 100 нм [1]. В 1996 г. были экспериментально продемонстрированы суперлюминесцентные диоды (СЛД) с центральной длиной волны излучения 820 нм и шириной трехгорбого спектра 98 нм [2]. Однако эта ширина получена при комбинированной импульсно-непрерывной инжекции и характеризует усредненный спектр. Мгновенные значения ширины спектра, определяющие длину когерентности излучения, приблизительно на треть меньше. Позднее были продемонстрированы СЛД того же диапазона с шириной спектра до 91.5 нм, работавшие в непрерывном режиме [3]. Результаты этой работы не применялись на практике, что, по-видимому, связано с трудностью получения воспроизводимых параметров для использованной в активной области асимметричной четырехслойной наногетероструктуры.

В настоящее время серийно выпускаются широкополосные квантоворазмерные СЛД, работоспособные в различных диапазонах спектра. Они находят применение в различных прикладных областях, среди которых первое место занимает оптическая когерентная томография (ОКТ) [4]. В этом случае ширина спектра является ключевым параметром, определяющим пространственное разрешение используемой интерференционной методики. Для СЛД с центральными длинами волн более 900 нм стонанометровый рубеж по ширине полосы давно преодолен [5, 6]. Что же касается коротковолнового, граничащего с видимым, ИК диапазона, то в настоящее время ши-

рина спектра соответствующих СЛД не превышает 70 нм. Напомним, что для «популярных» длин волн 1060, 980 и 830 нм полоса в 100 нм соответствует энергетическим интервалам 0.11, 0.13 и 0.18 эВ соответственно.

Следует отметить, что в наиболее распространенных ОКТ-системах офтальмологического назначения в качестве источников света чаще всего используются широкополосные СЛД именно ближайшего ИК диапазона, т.к. он соответствует основному «окну прозрачности» глазной жидкости. К настоящему времени выпущено более 10000 отечественных СЛД-модулей серии SLD-37 с типичной шириной спектра 50 нм. Они успешно работают в составе ОКТ-систем по всему миру. Выпуск модулей серии SLD-35 с шириной спектра до 70 нм не стал столь массовым, однако около сотни научных центров, университетов и фирм, ведущих разработки и исследования новых систем ОКТ, приобрели эти модули либо отдельно, либо в составе комбинированных источников света серии BroadLighter. Подобные СЛД-модули выпускаются и успешно реализуются также фирмами EXALOS (серия EXS21) и DenseLight (серия DL-CR8). Востребованность СЛД данного спектрального диапазона с повышенной широкополосностью не вызывает сомнений.

2. Экспериментальные результаты

Экспериментальные образцы СЛД были изготовлены из полупроводниковой гетероструктуры с отдельным ограничением электромагнитного поля и носителей заряда и со стандартными для системы (AlGa)As геометрией слоев и составами контактных, эмиттерных и волноводного слоев. Особенностью гетероструктуры является конструкция квантоворазмерной активной области, обеспечивающая возможность получить центральную длину волны усиленного спонтанного излучения около 840 нм и при этом сильно «раздвинуть» спектральные максимумы, соответствующие квантовым переходам из основного и возбужденного состояний. Решение данной задачи невозможно при использовании традиционных для гетероструктур данного спектрального диапазона квантовых ям из GaAs. Проведенные расчеты показали, что практическая реализация указанных параметров требует использования напряженных сверхтонких квантовых ям из твердого раствора (InGa)As с небольшим содержанием In.

С.Н.Ильченко. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, п/я 70

С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: tm.mohax@mail.ru, y akubovich@superlumdiodes.com

М.А.Ладугин. ООО «Сигм Плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: M.Ladugin@siplus.ru

А.А.Мармалюк. ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: marm@siplus.ru

Поступило в редакцию 19 сентября 2012 г.

Такой подход позволяет увеличить высоту потенциального барьера квантовой ямы, что в совокупности с ее малой шириной дает возможность увеличить расстояние между уровнями размерного квантования до нужных значений, сохраняя положение центральной длины волны излучения. В расчетах использовалась модель прямоугольной квантовой ямы.

Эпитаксиальная гетероструктура (InGa)As/(AlGa)As с одной квантовой ямой выращивалась методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении на подложках GaAs (100) в горизонтальном реакторе проточно-го типа. В качестве исходных материалов элементов III группы использовались триметилалюминий, триэтилгаллий и триметилиндий, материалом V группы выступал 100%-ный арсин, газом-носителем служил водород. В качестве лигатуры n- и p-типа были смесь силана с водородом и диэтилцинк соответственно. Температура роста изменялась в диапазоне 640–770 °С, а давление в реакторе – в диапазоне 60–65 Тор. Конструкция СЛД была традиционной. Активный канал представлял собой гребневидный волновод шириной 4 мкм, ось которого имела наклон 7° по отношению к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены антиотражающие покрытия.

Измерения проводились в непрерывном режиме инжекции при комнатных температурах. Как и следовало ожидать, выравнивание спектральных максимумов удалось получить только у СЛД с малыми длинами активных каналов ($L_a \leq 700$ мкм). Ватт-амперные характеристики СЛД представлены на рис.1. К сожалению, в ходе

постростовой обработки гетероэпитаксиальной пластины была неудачно выполнена операция изготовления омического р-контакта. По этой причине диоды обладали повышенным дифференциальным электрическим сопротивлением, что наряду с высоким тепловым сопротивлением, характерным для образцов малых размеров, привело к тому, что при плотностях тока инжекции более 5 кА/см² наблюдалось тепловое насыщение выходной мощности.

Выравнивание спектральных максимумов происходило при плотности тока 10–11 кА/см². Выходная мощность заметно зависела от рабочей температуры, тогда как спектральные характеристики при изменении температуры на 10 °С оставались практически неизменными (табл.1). Примеры спектров максимальной ширины и соответствующие им автокорреляционные функции интенсивности для образцов длиной 400 и 700 мкм приведены на рис.2. Полуширины спектров около 100 нм для СЛД данного спектрального диапазона являются рекордными. Уровень непрерывной выходной мощности порядка единиц милливольт достаточен для ряда метрологических применений и для некоторых систем ОКТ. Предварительные ресурсные испытания исследованных СЛД позволяют оценить их срок службы (около 500 ч). Такой срок приемлем только для приборов, предназначенных для лабораторных исследований.

Сама по себе плотность рабочего тока инжекции 10⁴ А/см² не является запредельной для СЛД. Мы не сомневаемся в том, что улучшение электрофизических характери-

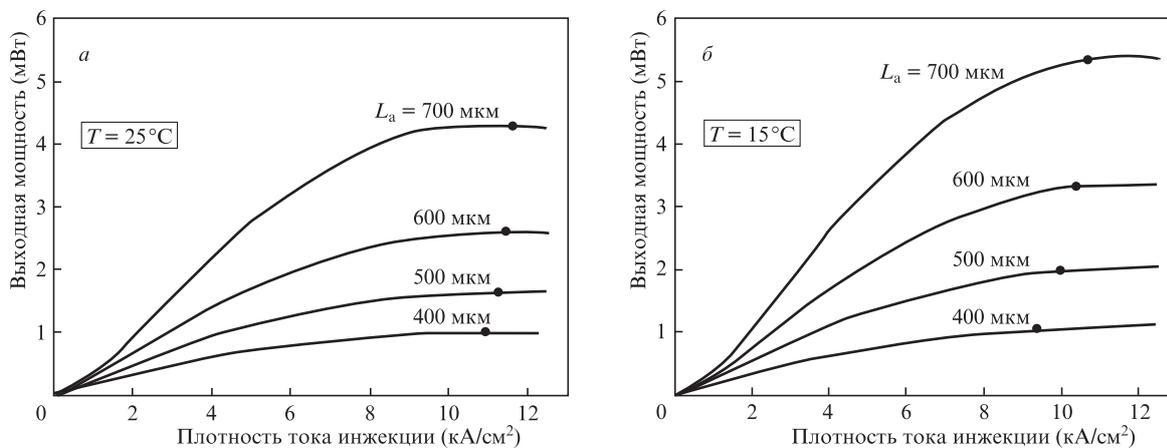


Рис.1. Ватт-амперные характеристики СЛД с различными длинами активного канала L_a при температурах 25 °С (а) и 15 °С (б). Отмечены рабочие точки, соответствующие выровненным спектральным максимумам.

Табл.1. Характеристики СЛД с активным слоем состава $\text{In}_{0,04}\text{Ga}_{0,96}\text{As}$ с различными длинами активных каналов при выровненных спектральных максимумах.

T (°C)	L_a (мкм)	I (мА)	J (кА/см ²)	P_{FS} (мВт)	P_{SM} (мВт)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	SF (%)	L_{coh} (мкм)
25	400	175	10.9	1.0	0.3	830	102	20	6.8
	500	230	11.5	1.4	0.5	832	99	27	7.0
	600	280	11.7	2.5	1.0	834	94	34	7.4
	700	350	12.5	4.0	1.6	836	92	40	7.6
15	400	156	9.4	1.1	0.3	829	101	21	6.8
	500	297	10.0	2.0	0.7	831	98	28	7.0
	600	250	10.4	3.3	1.3	833	94	35	7.4
	700	306	10.7	5.4	2.2	835	92	42	7.6

Примечание: T – рабочая температура; L_a – длина активного канала; 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; $\Delta\lambda$ – спектральная полуширина; SF – глубина спектрального провала; L_{coh} – длина когерентности.

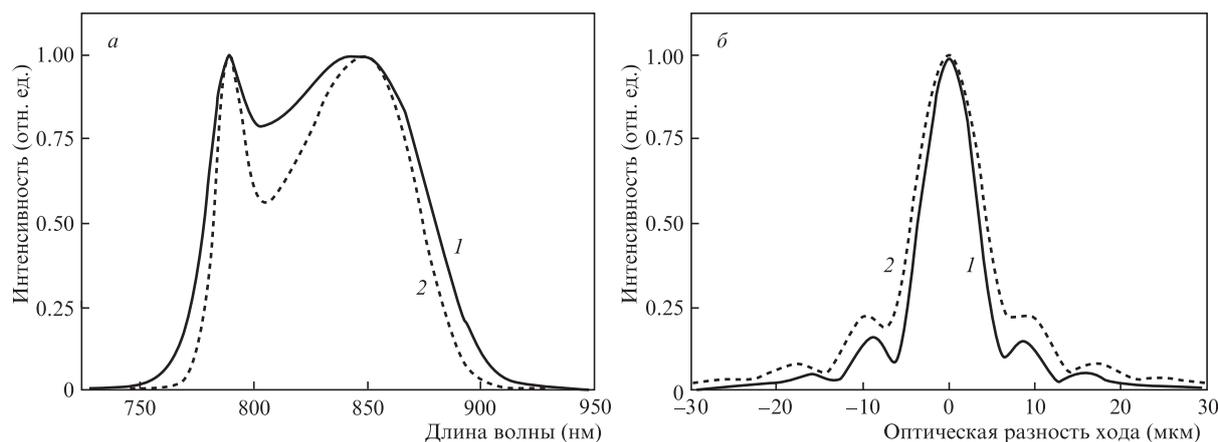


Рис.2. Спектры максимальной ширины излучения (а) и центральные пики соответствующих АКФ (б) для СЛД с $L_a = 400$ (1) и 700 мкм (2).

стик СЛД на основе данной наногетероструктуры позволит повысить их выходную мощность и обеспечить приемлемую надежность. В свое время обзорная статья [7] получила название «Towards 100nm-wide SLDs at 840 nm band». Настоящая работа – заметный шаг в указанном направлении.

Авторы выражают благодарность А.Т.Семенову за инициирование проведенного исследования.

Работа частично поддержана грантом Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» № 14.В37.21.0756.

1. Helstein M.M., Melhuys B., Yariv A. *Appl. Phys.*, **54**, 1092 (1989).
2. Батоврин В.К., Гармаш И.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Любарский А.В., Сафин С.А., Семёнов А.Т., Шидловский В.Р. и др. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996).
3. Ching-Fuh Lin, Bor-Lin Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1598 (1997).
4. Drexler W., Fujimoto J.G. *Optical Coherence Tomography* (Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2008).
5. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **33** (6), 471 (2003).
6. Лапин П.И., Мамедов Д.С., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 315 (2006).
7. Kostin Yu., Lapin P., Shidlovski V., Yakubovich S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7139**, 713905-1 (2008).