

# Широкополосные суперлюминесцентные диоды и полупроводниковые оптические усилители спектрального диапазона 750–800 нм

С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, И.А.Кукушкин, М.А.Ладугин,  
П.И.Лапин, А.А.Лобинцов, А.А.Мармалюк, С.Д.Якубович

*Исследованы суперлюминесцентные диоды (СЛД) и полупроводниковые оптические усилители (ПОУ) на основе однослойной квантоворазмерной структуры в системе  $(Al_xGa_{1-x})As/GaAs$  с концентрацией  $Al\ x \sim 0.1$  в активном слое толщиной 10 нм. В зависимости от длины активного канала СЛД непрерывная выходная мощность излучения через одномодовый волоконный световод составляла 1–30 мВт при ширине спектра около 50 нм. Полоса оптического усиления в активном канале превышала 40 нм. Предварительные ресурсные испытания продемонстрировали достаточно высокую надежность этих приборов.*

**Ключевые слова:** суперлюминесцентный диод, полупроводниковый оптический усилитель, квантоворазмерная гетероструктура.

## 1. Введение

В ближнем ИК диапазоне оптического спектра (800–1100 нм) работает ряд высокоэффективных источников излучения на основе СЛД. Для многих практических применений особый интерес представляют широкополосные СЛД с шириной спектральной линии более 50 нм [1–4], изготавливаемые обычно на основе полупроводниковых гетероструктур с квантоворазмерными активными слоями. Такие СЛД работают при значительно более высоких концентрациях неравновесных носителей, чем аналогичные лазерные диоды. Это позволяет обеспечить усиление собственного спонтанного излучения, соответствующее квантовому переходу не только из основной зоны, но и из возбужденных подзон энергетического спектра. Особенностью СЛД на основе квантоворазмерных структур является сильная зависимость формы спектра (обычно, двугорбого) от конфигурации активного канала и рабочего режима.

В длинноволновом крае видимого спектрального диапазона (750–800 нм) также работают достаточно мощные СЛД-излучатели (Superlum, Exalos, InPhenix, Qphotonics и др.), но их ширина спектра не превышает 22 нм. Эти СЛД изготавливаются на основе гетероструктур с активным как объемным, так и квантоворазмерным слоем из  $(GaAl)As$  или  $(InGa)AsP$ . В последнем случае вклад в суперлюминесценцию вносят квантовые переходы только из основного состояния. В работе [5] показано, что квантовые точки InP в слоях  $(GaIn)P$ , согласованных по периоду решетки с GaAs, обладают широким спектром фотолюминесценции ( $\Delta\lambda \sim 50$  нм) в данном спектральном диапазоне, однако нам неизвестно о

реализации инжекционных лазеров или СЛД на основе таких структур.

Ранее нами предпринимались попытки разработать широкополосные квантоворазмерные СЛД данного спектрального диапазона. Ширина спектра выходного излучения экспериментальных образцов при плотностях тока инжекции 7–8 кА/см<sup>2</sup> составила более 40 нм, однако их срок службы не превышал 100 ч. При пониженных плотностях тока эти образцы работали достаточно надежно, но их колоколообразный спектр излучения имел полуширину 15–20 нм.

В настоящей работе благодаря использованию технологических усовершенствований, описанных в [6], а также оптимизации процесса ионной очистки торцевых граней СЛД перед нанесением на них просветляющего покрытия удалось изготовить эффективные и достаточно надежные СЛД с центральной длиной волны излучения вблизи 780 нм и шириной спектра около 50 нм.

## 2. Экспериментальные образцы и результаты исследования

Исследованные СЛД созданы на основе однослойной квантоворазмерной структуры (ОКРС) в системе  $(Al_xGa_{1-x})As/GaAs$  с концентрацией  $Al\ x \sim 0.1$  в активном слое толщиной 10 нм. Ее зонная диаграмма изображена на рис.1. Использовалась широко распространенная конструкция СЛД с прямым гребневидным активным волноводом, расположенным под углом  $7^\circ$  относительно нормали к торцевым граням кристалла. Для лучшего подавления оптической обратной связи на торцевые грани кристалла было нанесено двухслойное просветляющее покрытие  $Al_2O_3/ZrO_2$ . Перед напылением покрытий на торцевые грани проводилась очистка поверхности скола от загрязнений и окислов низкоэнергетическими (около 50 эВ) ионами аргона. Для этого использовался технологический ионный источник кауфмановского типа, создающий в вакуумной камере поток ионов аргона. Очистка торцевой грани и последующее

С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, И.А.Кукушкин, М.А.Ладугин, П.И.Лапин, А.А.Лобинцов, А.А.Мармалюк, С.Д.Якубович. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, а/я 70; e-mail: i\_a\_kukushkin@mail.ru

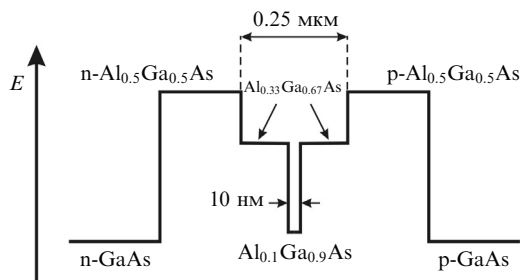


Рис.1. Зонная диаграмма однослойной квантоворазмерной структуры (GaAl)As/GaAs.

нанесение просветляющего покрытия проводились в одном вакуумном цикле. При напылении слоев электронно-лучевым методом использовалось дополнительное облучение ионами аргона со средней энергией 100 эВ. Толщина активного волновода составляла 0.25 мкм при ширине 4 мкм, а его длина варьировалась в диапазоне 700 – 1600 мкм с шагом 100 мкм. Измерения выполнялись в режиме непрерывной инжекции при стабилизации тока накачки и температуры с помощью драйвера PILOT-4.

Типичная эволюция спектра исследованных СЛД при изменении тока инжекции представлена на рис.2,а. Спектр содержит два хорошо выраженных максимума, обусловленных квантоворазмерным эффектом, в областях 760 и 790 нм. Характерные зависимости мощности, излучаемой в открытое пространство, от тока инжекции для об-

разцов с различными длинами активного канала показаны на рис.2,б. Оптимальный режим работы СЛД с подобной формой спектра соответствует току инжекции, при котором спектральные максимумы выравниваются, и полуширина спектра становится максимальной, обеспечивая минимальную длину когерентности. Оптимальные режимы для СЛД с различными длинами активного канала отмечены на рис.2,б точками (для СЛД с длиной активного канала 1600 мкм добиться выравнивания спектральных максимумов при приемлемом токе инжекции не удалось).

Основные мощностные и спектральные характеристики исследованных СЛД в оптимальных режимах приведены в табл.1.

На рис.3 представлен центральный пик типичной для данных СЛД автокорреляционной функции интенсивности (АКФ). На панорамной АКФ из-за очень малой глубины остаточной модуляции спектра модами Фабри–Перо вторичные пики практически не превышают уровня шума.

Образцы подвергались предварительным ресурсным испытаниям в рабочих режимах при стабилизированном токе и температуре 25 °С. Типичные кривые, характеризующие процесс деградации исследованных СЛД, представлены на рис.4. Линейная экстраполяция этих кривых позволила оценить время наработки на отказ, которое составило 4000 – 7000 ч для СЛД с двугорбым спектром и более 10000 ч для СЛД с колоколообразным спектром.

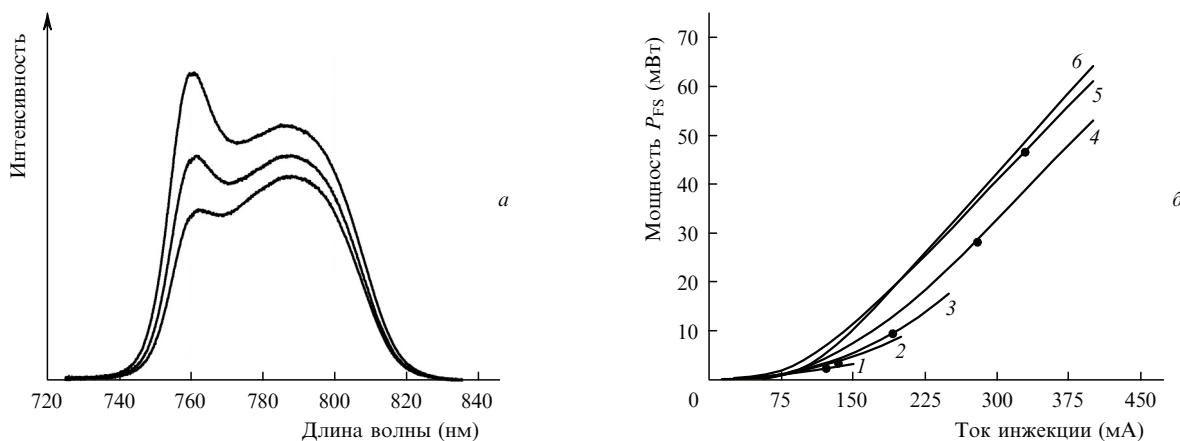


Рис.2. Типичная эволюция спектра выходного излучения СЛД при изменении тока инжекции (а) и ватт-амперные характеристики СЛД с длиной активного канала 700 (1), 800 (2), 1000 (3), 1200 (4), 1300 (5) и 1600 (6) мкм (б).

Табл.1. Характеристики СЛД с различной длиной активного канала в оптимальных режимах ( $L_a = 700 - 1300$  мкм) и при колоколообразной форме спектра ( $L_a = 1600$  мкм).

$L_a$ (мкм)	$I$ (мА)	$J$ (кА/см <sup>2</sup> )	$P_{FS}$ (мВт)	$P_{SM}$ (мВт)	$\lambda_m$ (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	$\delta S$ (%)	$L_c$ (мкм)
700	115	4.1	3.10	1.0	779.5	54.4	12	11.2
800	135	4.2	4.15	1.7	781.3	51.9	19	11.8
900	170	4.7	6.05	3.0	782.5	50.6	17.5	12.1
1000	190	4.8	10.2	5.4	782.7	49.5	19	12.4
1100	205	4.7	16.8	9.0	782.4	48.8	21	12.5
1200	265	5.6	28.1	17.6	782.1	47.5	21.5	12.9
1300	344	6.3	55.6	30.4	781.7	47.3	25	12.9
1600	320	5.0	57.6	32.2	790.8	24	–	26.1

Примечание:  $L_a$  – длина активного канала;  $I$  – ток инжекции;  $J$  – плотность тока инжекции;  $P_{FS}$  – мощность, излучаемая в открытое пространство;  $P_{SM}$  – мощность излучения на выходе одномодового волоконного световода (использовалось оптимальное для данного спектрального диапазона волокно Corning Pure Mode 720 с цилиндрической микролинзой на входном торце);  $\lambda_m$  – медианная длина волны излучения;  $\Delta\lambda$  – полуширина спектра излучения;  $\delta S$  – глубина спектрального провала (см. рис.2,а);  $L_c$  – длина когерентности, оцененная по формуле  $L_c = \lambda^2/\Delta\lambda$ .

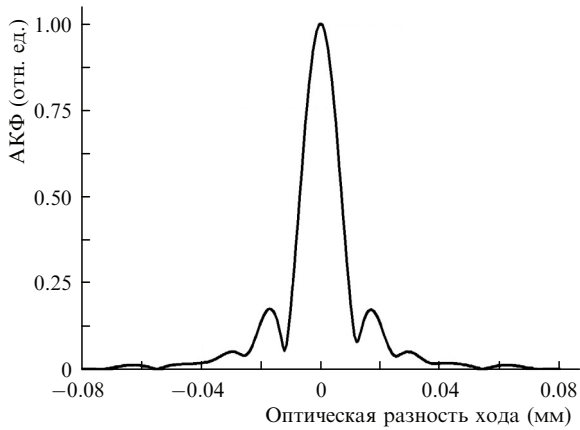


Рис.3. Центральный пик автокорреляционной функции интенсивности СЛД ( $L_a = 1000$  мкм,  $I = 225$  мА).

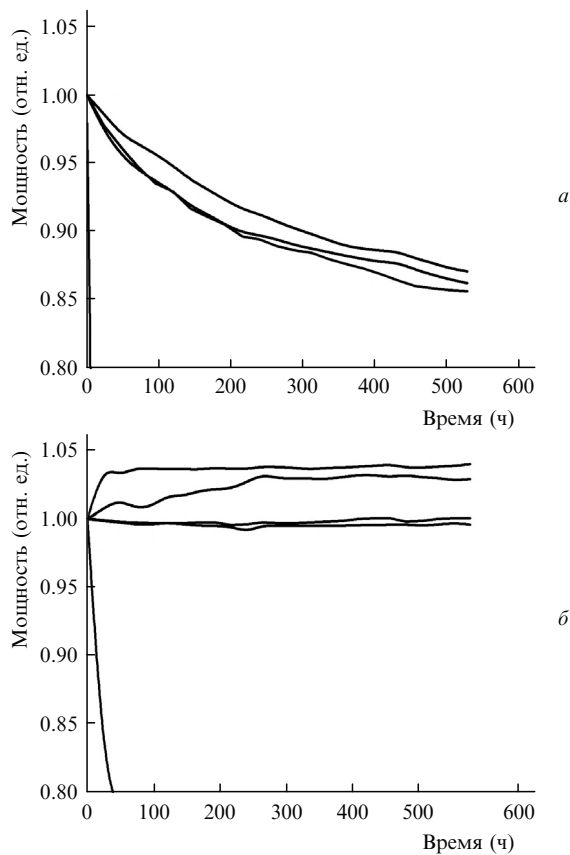


Рис.4. Хронограммы предварительных ресурсных испытаний СЛД с длиной активного канала  $L_a = 1000$  (а) и  $1600$  мкм (б).

Исследованные СЛД весьма перспективны для широкополосных комбинированных источников света серии BroadLighter, основанных на суперпозиции излучения нескольких СЛД, обладающих частично перекрывающимися спектрами, с использованием широкополосных волоконно-оптических объединителей [7]. На рис.5 показан выходной спектр макета двухканального комбинированного источника, где в качестве коротковолнового излучателя использовался исследованный в данной работе СЛД. Такой источник света (предварительное наименование BroadLighter-D-810), обладающий шириной спектра 105 нм и длиной когерентности около 6.0 мкм, является наиболее коротковолновым из приборов данной серии.

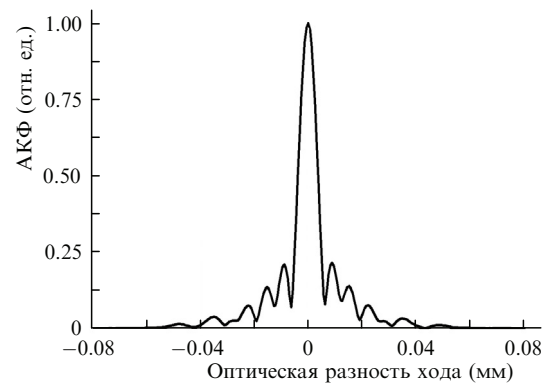
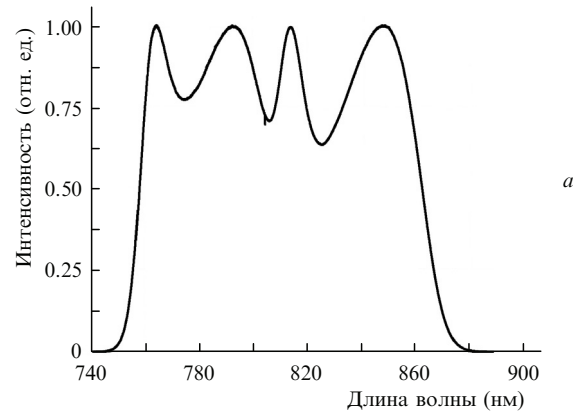


Рис.5. Спектр нового комбинационного источника света серии BroadLighter, в котором использован один из исследованных СЛД (а), и центральный пик его АКФ (б).

Сравнение спектров суперлюминесценции СЛД с различными длинами активных каналов при одинаковых плотностях тока инжекции позволяет оценить спектр погонного оптического усиления и «чистое» усиление слабого сигнала  $G$  в образце заданной длины [8]. На рис.6 представлены результаты такого расчета для  $L_a = 1100$  мкм. Так, при плотности тока  $J = 3000$  кА/см<sup>2</sup> полоса усиления по уровню 0.5 составляет около 40 нм, а по уровню 0.1 – около 50 нм. Планируется изготовление ПОУ-модулей с одномодовыми волоконными световодами на входе и выходе на базе исследованных активных элементов.

### 3. Заключение

Впервые разработаны высокоэффективные и достаточно надежные широкополосные СЛД с центральной

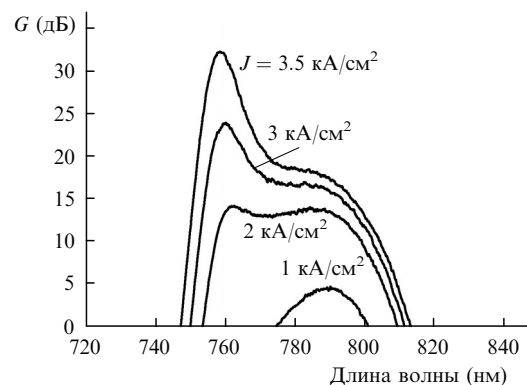


Рис.6. Спектр усиления слабого сигнала при различных плотностях тока.

длиной волны излучения 780 нм. Вариация длины активного канала позволяет получить непрерывную оптическую мощность на выходе ОВС от 1 до 30 мВт при полуширине спектра около 50 нм. Разработанные приборы могут быть использованы в качестве активных элементов как СЛД-, так и ПОУ-модулей.

Авторы выражают признательность А.Т.Семенову за инициирование проведенных исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке Федерального агентства по образованию (проект 2.1.1.12404).

1. Батоврин В.К., Гармаш Н.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Любарский А.В., Плявенек А.Г., Сафин С.А., Семенов А.Т., Шидловский В.Р., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996).
2. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **33** (6), 471 (2003).
3. Лапин П.И., Мамедов Д.С., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 315 (2006).
4. Kostin Yu.O., Lapin P.I., Prokhorov V.V., Shidlovsky V.R., Yakubovich S.D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7139**, 713905-1 (2008).
5. Miyake S., Lee W.S., Ujihara T., and Takeda Y. *Proc. Indium Phosphide and Related Materials Conf.* (Princeton, 2006, p. 208).
6. Лобинцов А.А., Успенский М.Б., Шишкин В.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **40** (4), 305 (2010).
7. 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).
8. Голдобин И.С., Семенов А.Т., Табунов В.П., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **9** (6), 1264 (1982).