

# Суперлюминесцентные диоды на основе двухслойных асимметричных наногетероструктур

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк,  
К.М.Панкратов, В.Р.Шидловский, С.Д.Якубович

*Экспериментально исследованы мощностные и спектральные характеристики суперлюминесцентных диодов (СЛД) ближнего ИК диапазона спектра на основе двухслойных асимметричных наногетероструктур в системе GaAs/InGaAs. Показано, что вариация состава активных слоёв и длины поперечно-одномодового активного канала этих СЛД позволяют изменять в широких пределах достижимую выходную оптическую мощность и ширину спектра излучения, сохраняя при этом его симметричную колоколообразную форму. Исследованные СЛД обладают более «чистой» автокорреляционной функцией интенсивности излучения, более слабой зависимостью ширины спектра излучения от тока инжекции и большей поляризацией излучения, чем широко распространённые СЛД на основе однослойных наногетероструктур, имеющие те же ширины спектра.*

**Ключевые слова:** суперлюминесцентный диод, асимметричная двухслойная наногетероструктура.

## 1. Введение

Полупроводниковые суперлюминесцентные диоды (СЛД) ближнего ИК диапазона спектра (800 – 900 нм) на основе гетероструктур в системе (GaAl)As первыми нашли практическое применение. В настоящее время они достаточно широко используются в качестве источников слабокогерентного света высокой яркости в научных исследованиях и различных прикладных областях (оптические датчики различных физических величин, оптическая когерентная томография (ОКТ), оптическая метрология и др.). Как правило, используются СЛД с поперечно-одномодовым активным каналом шириной в единицы микрометров, что, в частности, позволяет изготавливать миниатюрные светоизлучающие модули с выводом излучения через одномодовые волоконные световоды (ОВС). Наряду с уровнем выходной оптической мощности для большинства применений ключевыми параметрами являются форма и ширина спектра излучения, определяющие вид его автокорреляционной функции (АКФ). Так, для систем ОКТ (Fourier Domain OCT) желателен спектр большой ширины, форма которого близка к гауссовой. Первое обеспечивает малую длину когерентности  $L_c \approx \lambda^2/\Delta\lambda$  ( $\lambda$  – центральная длина волны,  $\Delta\lambda$  – полуширина спектра) и соответственно узкий центральный пик АКФ и высокое аксиальное разрешение томограмм, а второе – «чистую» АКФ с единственным центральным пиком, не имеющим пьедестала, что обеспечивает высокую чувствительность при записи изображений.

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, К.М.Панкратов, В.Р.Шидловский. ООО «Опто», Россия, 119330 Москва, ул. Мосфильмовская, 176  
М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3  
С.Д.Якубович. Московский технологический университет (МИРЭА), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78;  
e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 5 июня 2019 г.

Рассматриваемые СЛД первого поколения изготавливались на основе двусторонних (GaAl)As/GaAs-гетероструктур с отдельным ограничением (РО ДГС), содержащих «объёмный» активный слой толщиной около 200 нм (см., напр., [1, 2]). Форма их спектра суперлюминесценции, определяемая спектрами спонтанного излучения и оптического усиления, была близка к гауссовой и слабо зависела от уровня накачки. При длинах активного канала  $L_a$  около 1000 мкм и выходных мощностях в единицы и десятки милливатт величина  $\Delta\lambda$  не превышала 20 нм.

Использование гетероструктур с квантоворазмерными активными слоями (наноструктур) позволило значительно уширить спектр излучения СЛД. При использовании симметричных наноструктур с одной (SQW), двумя (DQW) или несколькими (MQW) квантовыми ямами шириной около 10 нм спектр суперлюминесценции определяется квантовыми переходами из основной и возбуждённых подзон. Его форма сильно зависит от уровня накачки, а максимальная ширина определяется шириной ям (энергетическим зазором между подзонами) [3–5] и при определённых условиях может превышать 100 нм [6]. При этом спектр обычно имеет двугорбую форму, а центральный пик АКФ – весьма высокий пьедестал.

В СЛД на основе SQW-структур со сверхтонким (единицы нанометров) активным слоем при разумных уровнях накачки наблюдаются квантовые переходы только из основной подзоны. Спектр имеет квазигауссовую форму, а его ширина сильно зависит от длины  $L_a$  и тока инжекции (выходной оптической мощности) [7]. У СЛД с  $L_a > 1300$  мкм при выходной мощности в открытое пространство  $P_{FS} > 50$  мВт ширина спектра  $\Delta\lambda$  не превышает 30–40 нм, а у «коротких» СЛД ( $L_a < 700$  мкм) мощность  $P_{FS}$  не превышает 10 мВт, зато  $\Delta\lambda$  может быть больше 60 нм. На рис.1 иллюстрируются перечисленные закономерности. На нём изображены типичные ваттамперные характеристики и зависимости  $\Delta\lambda$  от тока инжекции для трех СЛД одинаковой конфигурации на основе РО ДГС, различающихся только толщиной активного слоя.

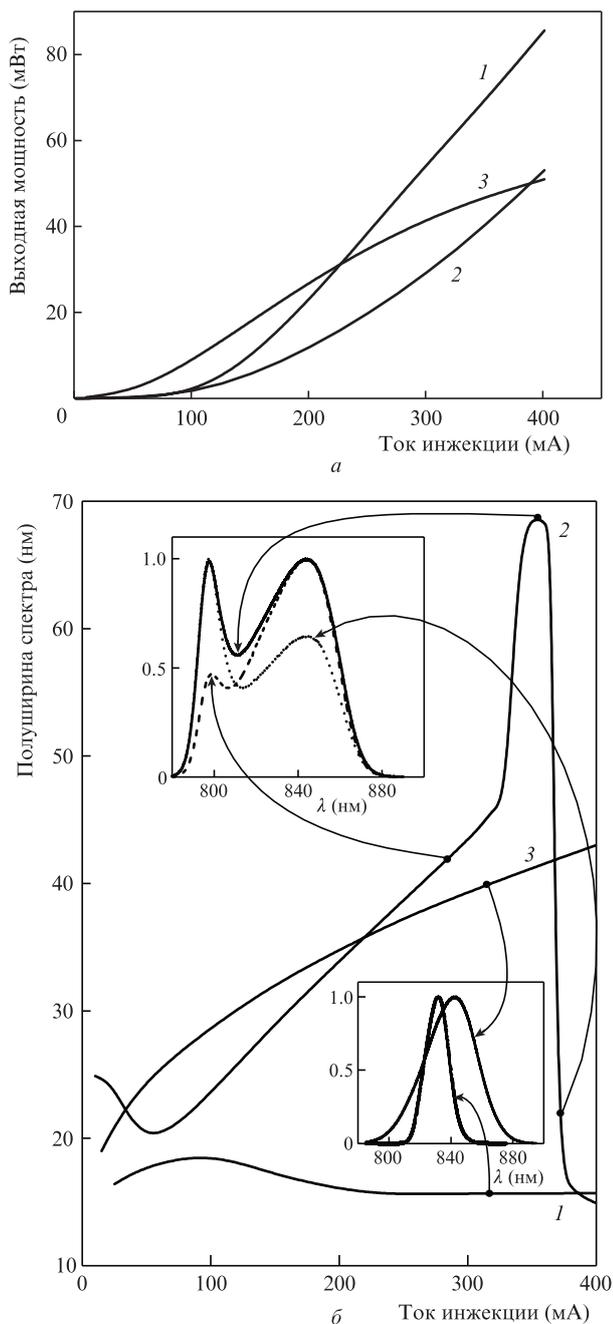


Рис.1. Типичные ватт-амперные характеристики (а) и зависимости полуширины спектра излучения от тока инжекции (б) «объёмного» (1) и кванторазмерных (2, 3) СЛД с одинаковой конфигурацией активного канала  $1200 \times 4 \times 0.24$  мкм и толщинами активного слоя 28 (1), 8.5 (2), 6.0 нм (3). На вставках – спектры СЛД при различных токах инжекции.

В настоящей работе исследованы экспериментальные образцы СЛД на основе наноструктур с двумя сверхтонкими активными слоями различного состава. В этом случае ширина спектра суперлюминесценции определяется расстоянием между максимумами спектров оптического усиления, соответствующих квантовым переходам из основных подзон каждой из квантовых ям.

## 2. Структура экспериментальных образцов

Исследованные СЛД были изготовлены на основе двухсторонних гетероструктур с разделным ограниче-

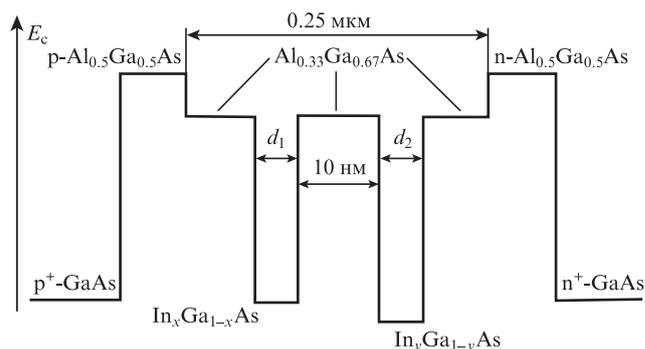


Рис.2. Схематическая зонная диаграмма асимметричной РО ДГС с двумя кванторазмерными активными слоями толщиной  $d_1$  и  $d_2$ .

нием в системе  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{As}/\text{GaAs}$  с двумя асимметричными кванторазмерными активными слоями (ADQW) из GaAs и  $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{As}$  толщиной в единицы нанометров, разделённых барьерным слоем толщиной 10 нм. Их зонная диаграмма схематически изображена на рис.2. Следует подчеркнуть, что все структуры обладали одинаковыми контактными, эмиттерными и волноводными слоями, различаясь только толщинами  $d_1$  и  $d_2$  и химическими составами активных слоёв. Эти различия отражены в табл.1. Там же приведены длины волн, соответствующие максимумам в спектрах их электролюминесценции.

Была использована традиционная конструкция СЛД с прямым, имеющим наклон  $7^\circ$  по отношению к нормали к торцевым граням кристалла, гребневидным активным волноводом шириной 4 мкм. Его длина  $L_a$  могла варьироваться с шагом 100 мкм в пределах 100 – 1600 мкм. Для подавления оптической положительной обратной связи на торцевые грани кристалла наносились двухслойные просветляющие покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ .

## 3. Основные характеристики исследованных СЛД

Изменение формы спектра исследованных СЛД с ростом тока инжекции качественно подобно таковому у SQW-СЛД с достаточно широкой квантовой ямой, в которой могут реализоваться квантовые переходы из основной и возбуждённой энергетических подзон (кривая 2 на рис.1,б). В нашем случае рассматриваемых ADQW-структур ту же роль играют основные состояния в каждой из ям. С увеличением концентрации неравновесных носителей заряда первой возникает суперлюминесценция, соответствующая стимулированным переходам в «низкоэнергетичной» яме. С ростом

Табл.1. Толщины, составы и положения максимумов спектра электролюминесценции активных слоёв ADQW-структур (тип I – симметричная DQW-структура).

Тип структуры	$d_1$ (нм)	Состав		$d_2$ (нм)	Состав 2	Длины волн спектральных максимумов (нм) ( $T = 25^\circ\text{C}$ )
		1	2			
I	7.0	GaAs	GaAs	7.0	GaAs	831
II	5.5	$\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}$	$\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$	5.5	$\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$	850. 870
III	6.5	GaAs	$\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$	5.5	$\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$	829. 869
IV	5.5	GaAs	$\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$	5.5	$\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$	816. 871
V	5.0	GaAs	$\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$	5.5	$\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$	808. 868

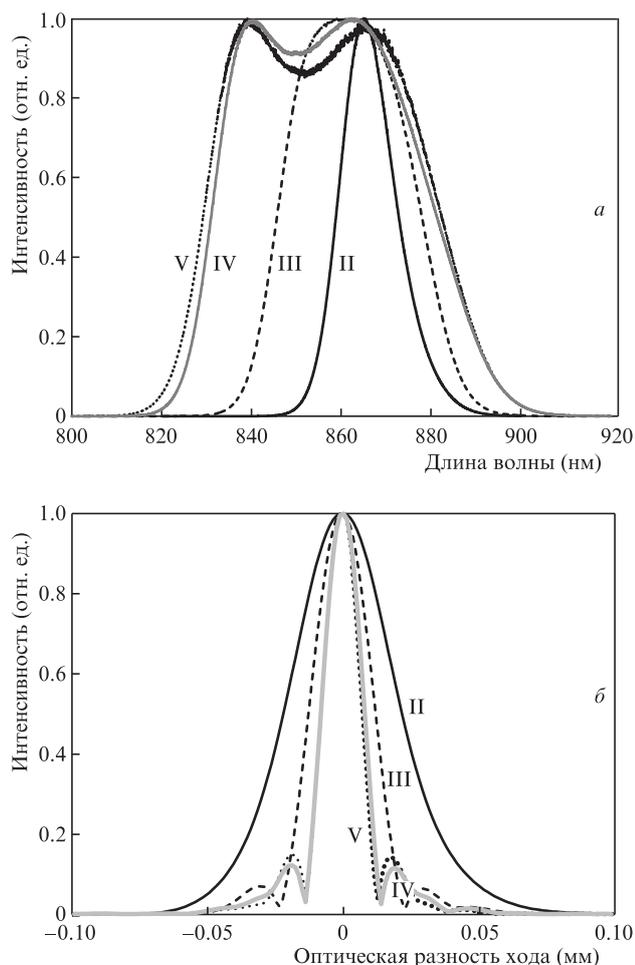


Рис.3. Типичные выровненные спектры излучения СЛД типов II – V с длиной активного канала  $L_a = 1600$  мкм (а) и соответствующие им АКФ интенсивности (б).

тока инжекции спектр уширяется из-за возникновения суперлюминесценции во второй яме. При некотором токе ширина спектра достигает максимального значения (рис.3), и с дальнейшим ростом тока спектр начинает сужаться, т.к. начинают доминировать переходы в «высокоэнергетичной» яме. При этом изменение шири-

ны спектра в зависимости от уровня накачки происходит значительно медленнее, чем у вышеупомянутых SQW-СЛД. Величина выходной оптической мощности, излучаемой при максимальной ширине спектра, сильно зависит как от асимметрии наноструктуры, так и от длины активного канала  $L_a$ . Указанные закономерности иллюстрирует табл.2.

Следует отметить, что у СЛД на основе симметричных DQW-структур с узкими квантовыми ямами (например, тип I, табл.1) ширина спектра суперлюминесценции очень слабо зависит от тока. Его полуширина не превышает 18 нм при  $L_a = 1000$  мкм и 12 нм при  $L_a = 1600$  мкм.

Наибольший практический интерес, в первую очередь для источников света, используемых в системах ОКТ, представляют СЛД типа IV (рис.4). Варьируя длину их активного канала, можно изменять в широких пределах (от единиц до сотни милливатт) выходную оптическую мощность при достаточно широком спектре излучения ( $\Delta\lambda_{max} \sim 50$  нм) и умеренной плотности тока инжекции. Исследованные приборы обладают рядом преимуществ по сравнению с широко распространёнными широкополосными СЛД на основе SQW-наноструктур с близкими значениями  $\Delta\lambda_{max}$ :

- симметричным спектром излучения с малой глубиной спектрального провала между максимумами, что в 2 – 3 раза снижает высоту пьедестала центрального максимума АКФ, повышая чувствительность интерференционных измерений;
- слабой зависимостью  $\Delta\lambda(I)$ : величина  $\Delta I$  в 5 – 6 раз больше, что значительно упрощает конструирование комбинированных источников света на основе двух и более подобных СЛД со смещёнными спектрами;
- повышенной степенью поляризации излучения (отношение ТЕ/ТМ поляризаций приблизительно на порядок выше), что в ряде применений позволяет отказаться от использования внешних поляризаторов;
- более слабой температурной зависимостью ширины спектра.

На рис.5 представлены температурные зависимости основных физических характеристик исследованных СЛД. Они однозначно указывают на то, что для большинства практических применений необходима термостабилизация активного элемента.

Табл.2. Спектрально-мощностные характеристики СЛД типов II – V при максимальной ширине спектра выходного излучения.

Тип структуры	$L_a$ (мкм)	$\lambda_m$ (нм)	$\Delta\lambda_{max}$ (нм)	$S_f$ (%)	$I_{max}$ (мА)	$\Delta I$ (мА)	$P_{FS}(I_{max})$ (мВт)
II	1000	872	20	0	30	15	0.1
	1300	873	19	0	40	20	0.2
	1600	874	18	0	50	25	0.6
III	1000	860	36	0	60	30	2
	1300	860	35	0	90	70	8
	1600	862	33	0	130	170	17
IV	1000	857	51	12	100	35	4
	1300	858	50	10	170	70	25
	1600	859	50	8	400	150	85
V	1000	855	56	15	130	40	6
	1300	856	52	13	240	80	45
	1600	857	50	12	520	190	125

Примечание:  $\lambda_m$  – медианная длина волны;  $\Delta\lambda_{max}$  – максимальная полуширина спектра;  $S_f$  – глубина провала между спектральными максимумами;  $I_{max}$  – ток инжекции, соответствующий  $\Delta\lambda_{max}$ ;  $\Delta I$  – диапазон тока инжекции  $I$ , в котором  $\Delta\lambda > 90\% \Delta\lambda_{max}$ ;  $P_{FS}$  – выходная оптическая мощность.

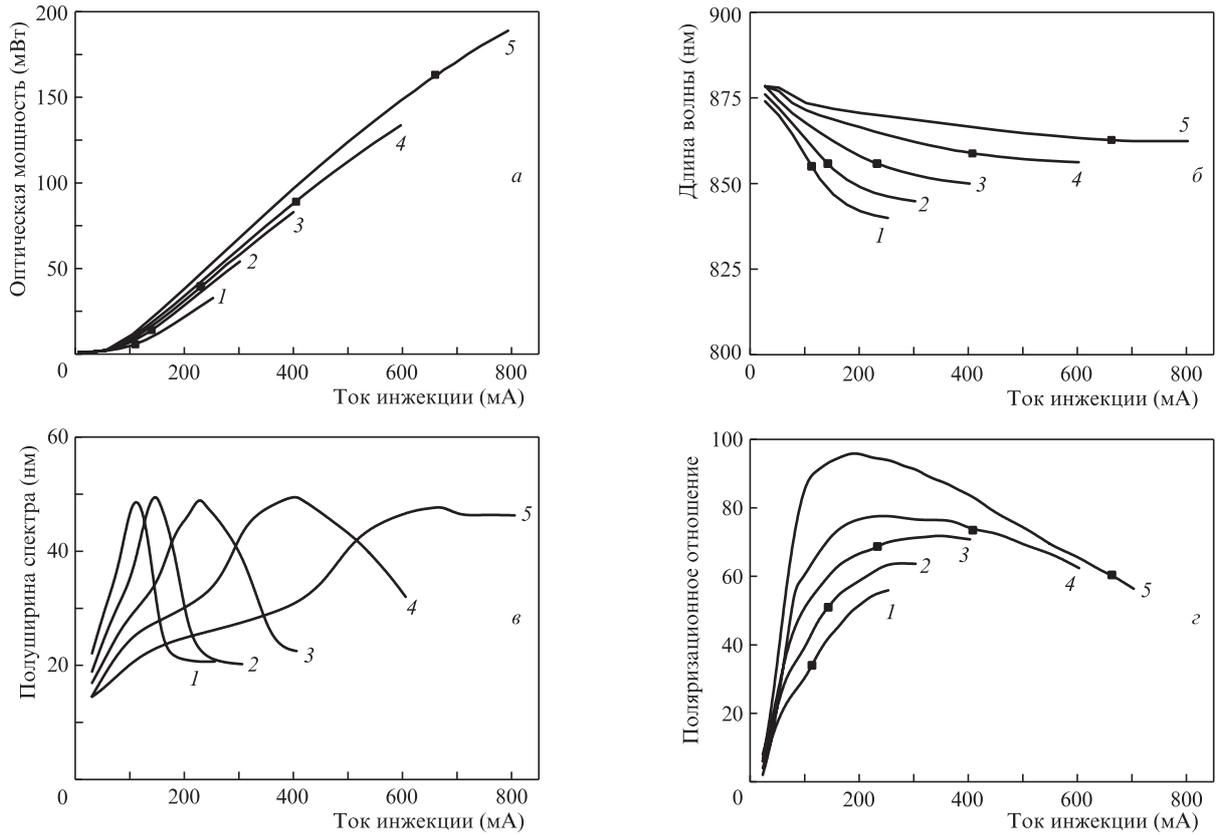


Рис.4. Зависимости выходной оптической мощности  $P_{FS}$  (а), медианной длины волны суперлюминесценции  $\lambda_m$  (б), полуширины спектра  $\Delta\lambda$  (в) и поляризационного отношения ТЕ/ТМ (г) от тока инжекции  $I$  при  $T = 25^\circ\text{C}$  для образцов СЛД типа IV с длиной активного канала  $L_a = 1000$  (1), 1200 (2), 1400 (3), 1600 (4) и 1800 мкм (5). Точки соответствуют  $\Delta\lambda_{\text{max}}$ .

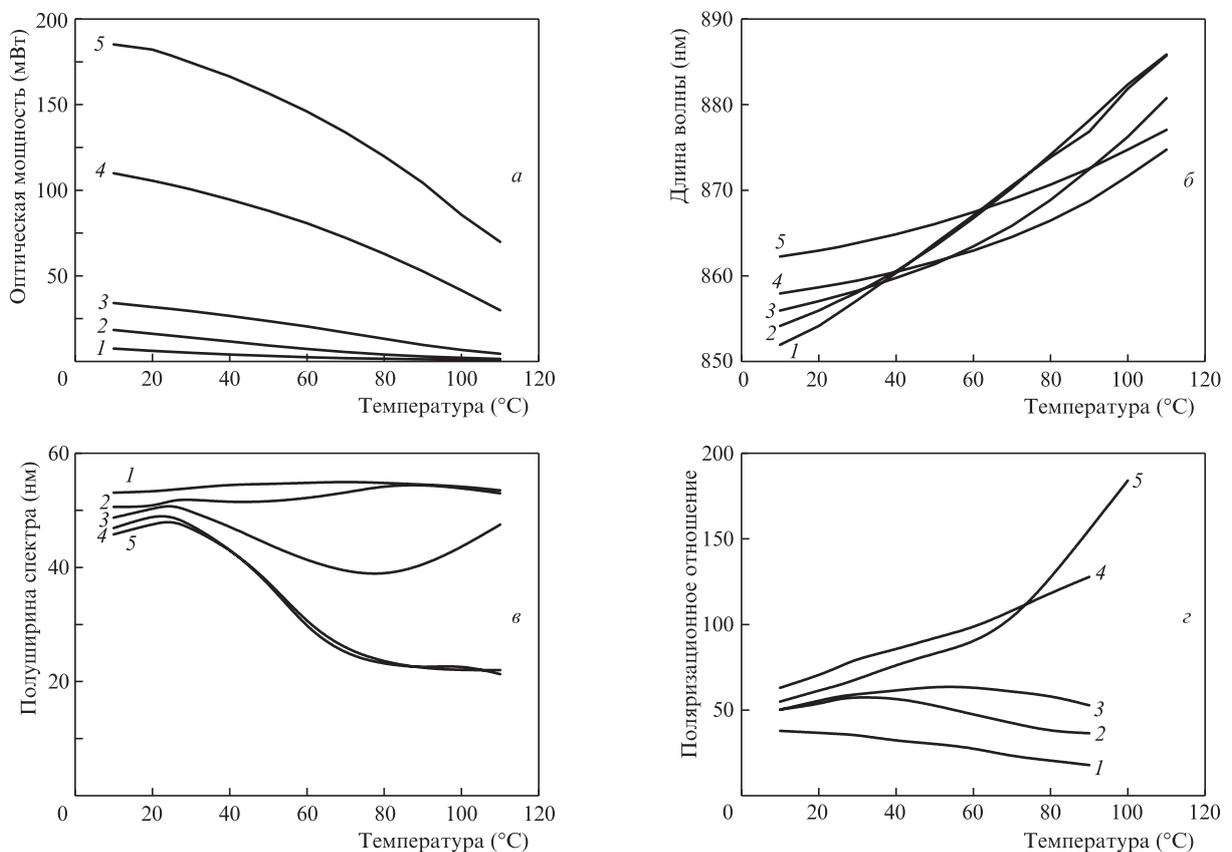


Рис.5. Зависимости величин  $P_{FS}$  (а),  $\lambda_m$  (б),  $\Delta\lambda$  (в) и отношения ТЕ/ТМ (г) от рабочей температуры  $T$  для образцов СЛД типа IV с  $L_a = 1000$  (1), 1200 (2), 1400 (3), 1600 (4) и 1800 мкм (5) при токах инжекции, соответствующих  $\Delta\lambda_{\text{max}}$  при  $T = 25^\circ\text{C}$ .

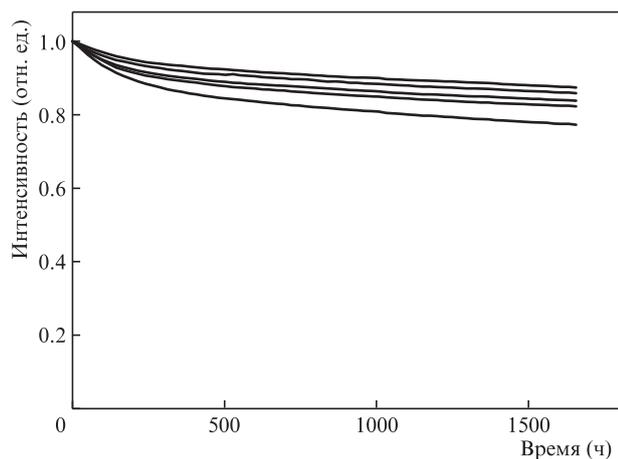


Рис.6. Хронограммы ресурсных испытаний при  $T = 25^\circ\text{C}$  образцов СЛД типа IV с  $L_a = 1600$  мкм при токе инжекции  $I = 400$  мА.

Предварительные ресурсные испытания в течение 2500 ч при комнатной температуре (рис.6) продемонстрировали достаточно высокую надёжность приборов типа IV. Оценочный срок их службы превышает 12000 ч.

#### 4. Заключение

Экспериментально показано, что пространственно-одномодовые СЛД на основе полупроводниковых ADQW-структур с оптимальным энергетическим зазором между основными подзонами тонких квантовых ям

при определённых токах инжекции имеют достаточно широкий (около 50 нм) спектр излучения колоколообразной формы, близкой к гауссовой. При этом их выходная оптическая мощность может изменяться в широких пределах за счёт изменения длины активного канала. По сравнению с широко используемыми широкополосными СЛД на основе SQW-структур исследованные приборы обладают рядом преимуществ, а именно: симметричным спектром излучения, форма которого близка к гауссовой; более слабыми зависимостями ширины спектра от тока инжекции и температуры; повышенной степени поляризации излучения.

1. Kwong N.S.K., Lau K.Y., Bar-Chaim N. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-25** (4), 696 (1989).
2. Safin S.A., Semenov A.T., Shidlovski V.R., Zhuchkov N.A., Kurnyavko Yu.V. *Electron. Lett.*, **28** (2) 127 (1992).
3. 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., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996) [*Quantum Electron.*, **23** (2), 113 (1996)].
4. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **33** (6), 471 (2003) [*Quantum Electron.*, **33** (6), 471 (2003)].
5. Лапин П.И., Мамедов Д.С., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 315 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (4), 315 (2006)].
6. Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **42** (11), 961 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (11), 961 (2012)].
7. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Ладугин М.А., Лапин П.И., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **43** (8), 751 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (8), 751 (2013)].