

# Изменение выходных характеристик широкополосных суперлюминесцентных диодов в ходе продолжительной работы

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, П.И.Лапин, Д.С.Мамедов, С.Д.Якубович

*Описана методика и приведены результаты ресурсных испытаний квантоворазмерных суперлюминесцентных диодов (СЛД) серии SLD-37, широко используемых в оптической когерентной томографии. Особое внимание уделено изменению спектров излучения СЛД в процессе их старения. Показано, что использование данной методики при входном контроле обработанных полупроводниковых гетероструктур, предназначенных для изготовления активных элементов СЛД-модулей, позволяет обеспечить их селекцию по ожидаемому сроку службы.*

**Ключевые слова:** квантоворазмерная гетероструктура (наноструктура), суперлюминесцентный диод, срок службы, надежность.

## 1. Введение

Среди источников света для систем оптической когерентной томографии (ОКТ) [1] ведущее положение занимают суперлюминесцентные диоды (СЛД), обладающие, наряду с общеизвестными достоинствами полупроводниковых светоизлучающих приборов, необходимыми для ОКТ высокой яркостью и низкой степенью когерентности. Среди отечественных приборов этого класса наиболее широкое распространение получили светоизлучающие модули серии SLD-37 на основе квантоворазмерных (наноструктурных) СЛД ближнего ИК диапазона спектра (800–900 нм). Эти модули, а также модули усовершенствованной модели SLD-35, используются в десятках лабораторий и фирм, ведущих исследования и разработку новых систем ОКТ. Кроме того, модули серии SLD-37 используются рядом фирм, осуществляющих серийный выпуск систем ОКТ, главным образом, для офтальмологической диагностики, и общий объем поставок этих модулей уже превысил 10 000 штук.

Рассматриваемые СЛД изготавливаются из однослойной квантоворазмерной (GaAl)As/GaAs-гетероструктуры с раздельным ограничением [2, 3]. Их активный канал представляет собой гребневидный поперечно-одномерный волновод шириной 4 мкм. Выходная оптическая мощность в открытое пространство в непрерывном режиме составляет в зависимости от технических требований 5–35 мВт. Плотность потока излучения на выходных гранях кристалла равна соответственно 1.2–8.5 мВт/мкм, или 0.12–0.85 мВт/см<sup>2</sup>. Эти значения много ниже порога катастрофической оптической деградации (КОД), лежа-

щего для этих приборов в диапазоне 3–6 мВт/см<sup>2</sup>. Обширная статистика показывает, что за исключением случаев «детской смертности», исключаемых на первом этапе ресурсных испытаний, мгновенные (катастрофические) отказы этих СЛД наблюдаются крайне редко.

Что касается медленной деградации (старения), то периодические выборочные ресурсные испытания показали, что для различных партий приборов средний срок службы составляет от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч часов. Эта величина определялась на основе анализа временных зависимостей выходной оптической мощности в режиме автоматического контроля тока инжекции (АКТ) или тока в режиме автоматического контроля выходной мощности (АКМ) исходя из критериев, принятых для испытаний лазерных диодов (ЛД). До последнего времени эта ситуация устраивала и заказчиков, и производителя. Однако с некоторых пор, по мере все более широкого использования систем ОКТ, содержащих эти источники света, в медицине и других областях, вопрос обострился. Прогнозирование срока службы (времени жизни) каждой партии приборов становится необходимым.

Очень важно указать на спектральные особенности рассматриваемых СЛД. В отличие от традиционных торцевых ЛД и СЛД на основе «объемных» полупроводниковых гетероструктур, форма спектра излучения которых практически не изменяется при небольших вариациях тока инжекции или в ходе старения, в квантоворазмерных СЛД указанные спектральные зависимости проявляются гораздо сильнее. Насколько нам известно, этот вопрос систематически не исследовался. В устройствах ОКТ ширина спектра источника излучения  $\Delta\lambda$  (длина когерентности  $L_{\text{coh}} \approx \lambda^2/\Delta\lambda$ ), определяющая пространственное разрешение томограмм, является ключевым параметром. Величина  $\Delta\lambda$  становится наибольшей при определенном рабочем токе, когда в спектре суперлюминесценции выравниваются спектральные максимумы, соответствующие квантовым переходам из основной и возбужденных подзон [4]. Именно в этой рабочей точке обычно эксплуатируются СЛД-модули в ОКТ-системах. Сильная деформация спектра, приводящая к уменьшению  $\Delta\lambda$ , которая может появ-

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, П.И.Лапин, Д.С.Мамедов. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 119454 Москва, п/я 70

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

Поступила в редакцию 4 марта 2011 г., после доработки – 13 апреля 2011 г.

виться в ходе старения СЛД, в данном случае недопустима.

Ниже будет рассмотрено как «мощностное», так и «спектральное» старение. Будет показано, что «спектральное» старение часто опережает «мощностное». Можно ожидать, что в режиме АКМ спектр будет деформироваться медленнее, чем в режиме АКТ. Для подтверждения этого требуются количественные результаты, опирающиеся на достаточную статистику.

Вскоре после создания полупроводниковых лазеров начались исследования процессов их деградации. За прошедшие годы на эту тему опубликованы сотни оригинальных статей и более десятка обзоров и монографий (см., напр., [5–10]). Благодаря технологическому прогрессу порог КОД и срок службы ЛД различных типов продолжают увеличиваться. Тем не менее далеко не всегда ясно, какие физические механизмы определяют деградацию того или иного типа ЛД. В обзоре [9] таких механизмов рассматривается более десяти, а в недавно построенной теоретической модели КОД поперечно-одномодовых ЛД [11] учитываются шесть механизмов тепловыделения. По-видимому, каждый из них в какой-то мере влияет и на процесс медленного старения. К сожалению, значения параметров, характеризующие вклад каждого из механизмов в процесс деградации, не всегда поддаются определению.

Надежность конкретной партии ЛД зависит не только от их конструкции (от типов подложки, гетероэпитаксиальной структуры (ГЭС), активного световода, резонатора, электрических контактов и теплопровода, от особенности сборки и т.д.), но и от того, как они прошли технологический маршрут. Процесс изготовления ЛД включает в себя десятки технологических операций. Отклонение от оптимального режима при выполнении любой из них может привести к возникновению дефектов, влияющих на надежность прибора, в том числе дефектов, склонных к «отжигу» в ходе наработки. При недостаточно отлаженной технологии неизбежен разброс в ресурсных характеристиках однотипных ЛД из различных партий. Возможны ситуации, когда для разных партий однотипных ЛД доминирующими могут оказаться различные физические механизмы деградации. Все сказанное относится и к СЛД. Традиционный СЛД, по существу, отличается от традиционного ЛД только экстремально низкими коэффициентами отражения на торцах активного канала. Если сравнить СЛД и ЛД одинаковых конфигураций на основе одинаковых ГЭС при одних и тех же выходных мощностях, то основные различия наблюдаются в распределениях световых потоков и концентраций неравновесных носителей вдоль оси активного канала, причем среднее значение концентрации в СЛД значительно выше. Эти различия могут отразиться на ходе деградационных процессов.

В работах [12,13] исследовался процесс старения поперечно-одномодовых СЛД ближнего ИК диапазона спектра (800–900 нм), изготовленных из «объемной» двусторонней (GaAl)As-гетероструктуры с отдельным ограничением. Было показано, что при умеренной (5–10 мВт) непрерывной выходной мощности срок службы этих СЛД при комнатной температуре может превышать  $10^5$  ч. Насколько нам известно, публикации, посвященные исследованию надежности широкополосных квантоворазмерных СЛД указанного спектрального диапазона, отсутствуют.

В рамках настоящей работы мы не ставили перед собой задачи идентифицировать физические механизмы, определяющие процессы деградации исследованных СЛД. Мы

решали более скромную, но важную в практическом отношении задачу, – экспериментально исследовать изменения мощностных и спектральных характеристик этих приборов в процессе продолжительной работы и разработать методику оценки их ожидаемого срока службы.

## 2. Методика ресурсных испытаний активных элементов СЛД-модулей

К выходным характеристикам СЛД-модулей для систем ОКТ предъявляется целый ряд специфических требований. Обычно они эксплуатируются в условиях термостабилизации активного элемента при 25 °С. Их рабочий ток ограничен сверху, а выходная оптическая мощность жестко ограничена и снизу, и сверху. С учетом двугорбой формы спектра налагаются ограничения снизу и сверху на медианную длину волны  $\lambda$ , ограничения сверху на глубину провала между спектральными максимумами SF (spectral flatness) и на глубину остаточной модуляции спектра модами Фабри–Перо (ripple), а также ограничение снизу на величину  $\Delta\lambda$  (FWHM). Для модулей серии SLD-37, наиболее востребованных коммерческими системами ОКТ, минимальное значение  $\Delta\lambda$  равно 45 нм. Выполнение всех этих требований представляет собой сложную техническую задачу.

Особые трудности связаны с удержанием минимального значения  $\Delta\lambda$ , что обусловлено сильной зависимостью формы спектра от тока инжекции (рис. 1, а). При малых токах суперлюминесценция определяется квантовыми переходами из основного состояния. При этом спектр имеет колоколообразную форму. С ростом тока появляется коротковолновый максимум, связанный с квантовыми пе-

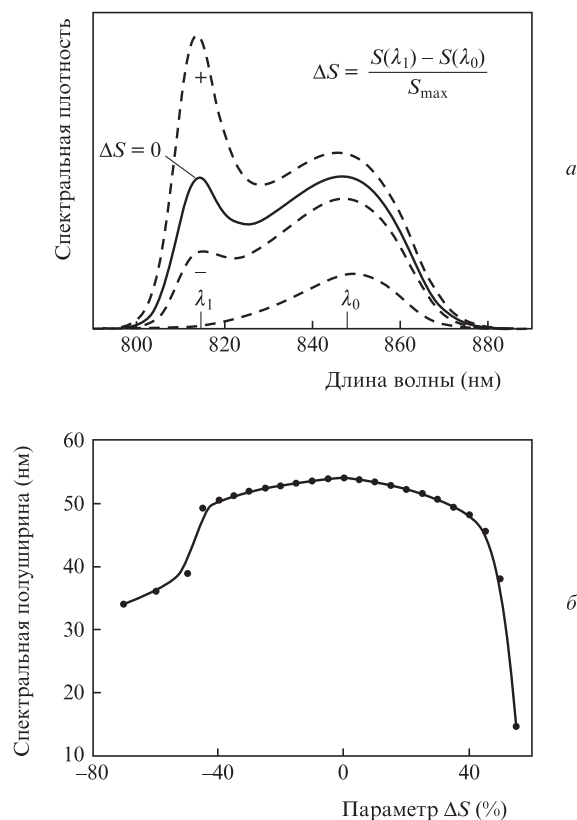


Рис. 1. Деформация спектра излучения СЛД при изменении тока инжекции (а) и зависимость полуширины спектра от параметра  $\Delta S$  (б).

реходами из возбужденной подзоны. При некотором токе  $I_0$  спектральные максимумы  $S(\lambda_1)$  и  $S(\lambda_2)$  выравниваются ( $\Delta S = 0$ ), и  $\Delta\lambda$  достигает максимума. С дальнейшим увеличением тока коротковолновый максимум становится доминирующим. Как было отмечено выше, СЛД-модули в системах ОКТ эксплуатируются именно в рабочей точке  $I = I_0$ . На рис.1,б представлена типичная зависимость  $\Delta\lambda$  от степени неравномерности спектра  $\Delta S$ . Очевидно, что в ходе длительной работы таких СЛД при фиксированных токе и температуре следует ожидать изменения не только выходной мощности, но и формы спектра излучения. В настоящей работе проведено исследование этих процессов применительно к активным элементам СЛД-модулей, а именно полупроводниковых диодных кристаллов на медных теплопроводах (СЛД-чипов). Достаточная надежность конструкции и технологии сборки модулей подтверждена многолетней практикой изготовления СЛД-модулей других типов.

При проведении испытаний активные элементы располагались в герметичных камерах в специальных восьмипозиционных оснастках, содержащих держатели, смонтированные на микроохладителях Пельтье типа ОТТ-23-1.3-28, систему прижимных контактов и линейки фотодиодов для измерения выходной оптической мощности. Термостабилизация активных элементов с погрешностью 0.1 °С, поддержание требуемых токов инжекции и измерения фототоков обеспечивались восьмиканальными контроллерами типа PILOT-4. В режиме АКТ они поддерживают заданные токи инжекции с погрешностью 0.1 мА, а в режиме АКМ – заданные фототоки с погрешностью 1 мкА, что соответствует погрешности измерения относительных мощностей около 0.01 %. Показания снимались автоматически один раз в сутки.

Каждая обработанная гетероэпитаксиальная структура (ОГЭС), а именно фрагмент ГЭС, прошедший по технологическому маршруту, содержит в себе сотни будущих активных элементов со сформированными активными каналами с боковым оптическим и электрическим ограничениями и контактами с *N*- и *P*-сторон. Заключительные операции изготовления активных элементов – это раскалывание ОГЭС на кристаллы, нанесение просветляющих торцевых покрытий и монтаж кристаллов на медные теплопроводы. Как правило, активные элементы, изготовленные из одной ОГЭС, имеют близкие выходные и ресурсные характеристики.

Из каждой ОГЭС изготавливалась пробная партия СЛД с активными каналами различной длины. После измерения их характеристик и выбора оптимальной конфигурации, соответствующей тем или иным техническим требованиям, партия из 16 образцов выбранной конфигурации подвергалась предварительным ресурсным испытаниям (burn-in) при рабочем токе  $I_0$  в режиме АКТ в течение 120–240 ч. По окончании этих испытаний повторно измерялись выходные спектральные характеристики. Эта процедура позволяет отбраковать образцы с грубыми технологическими дефектами, которые обычно деградируют в течение первых суток («детская смертность»), определить тенденцию изменения выходных характеристик СЛД в ходе их работы и отобрать 8 типичных образцов для проведения продолжительных ресурсных испытаний.

На рис.2 иллюстрируются тенденции, наблюдавшиеся в характере изменения выходной мощности в процессе предварительных испытаний образцов, изготовленных из

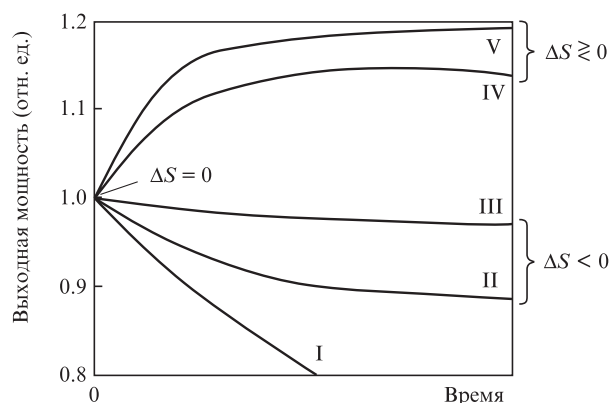


Рис.2. Хронограммы выходной мощности при начальной наработке СЛД из различных однотипных ОГЭС (режим АКТ).

различных ОГЭС. Для образцов типа I характерен монотонный быстрый спад выходной мощности (более 1% в сутки). Они не допускались к продолжительным испытаниям, а соответствующие ОГЭС отбраковывались. Образцы типа II демонстрировали замедляющийся спад мощности, который к концу предварительных испытаний не превышал 0.2%–0.4% в сутки. Для образцов типа III было характерно «медленное» старение с самого начала испытаний, а образцы типа IV демонстрировали рост мощности в начале испытаний, но после достижения некоторого максимума начиналось ее медленное снижение. Таким образом, к концу предварительных испытаний образцы типов II–IV вели себя практически одинаково. Образцы типа V демонстрировали замедляющийся, но не прекращающийся до конца предварительных испытаний рост мощности. Забегая вперед, укажем, что этот процесс продолжался до конца долговременных ресурсных испытаний. Что касается спектров выходного излучения, то у образцов типов II и III коротковолновый максимум ( $\Delta S < 0$ ) к концу испытаний снижался. У образцов типов IV и V в зависимости от ОГЭС к концу испытаний наблюдалась деформация спектра в коротковолновую ( $\Delta S > 0$ ) или в длинноволновую ( $\Delta S < 0$ ) сторону.

Описанные тенденции указывают на наличие по меньшей мере трех физических механизмов, влияющих на изменение выходных характеристик рассматриваемых СЛД в ходе их эксплуатации. Во-первых, это обычное старение, связанное с появлением новых центров безызлучательной рекомбинации, в результате чего снижаются концентрация неравновесных носителей при заданном токе инжекции и выходная мощность, а также понижается коротковолновый максимум в спектре излучения ( $\Delta S < 0$ ). К росту выходной мощности может приводить как отжиг дефектов, ведущий к снижению скорости безызлучательной рекомбинации, росту концентрации неравновесных носителей и соответствующему росту коротковолнового спектрального максимума ( $\Delta S > 0$ ), так и отжиг дефектов, в результате которого снижаются оптические потери в активном канале, что вместе с ростом эффективного коэффициента оптического усиления обуславливает снижение концентрации неравновесных носителей и коротковолнового спектрального максимума ( $\Delta S < 0$ ). Более того, исследования показали, что в случае испытаний одинаковых образцов СЛД при различных температурах доминирующими могут оказаться различные физические механизмы, изменяющие выходные характеристики. В качестве примера на рис.3 представлены хронограммы выходной мощности

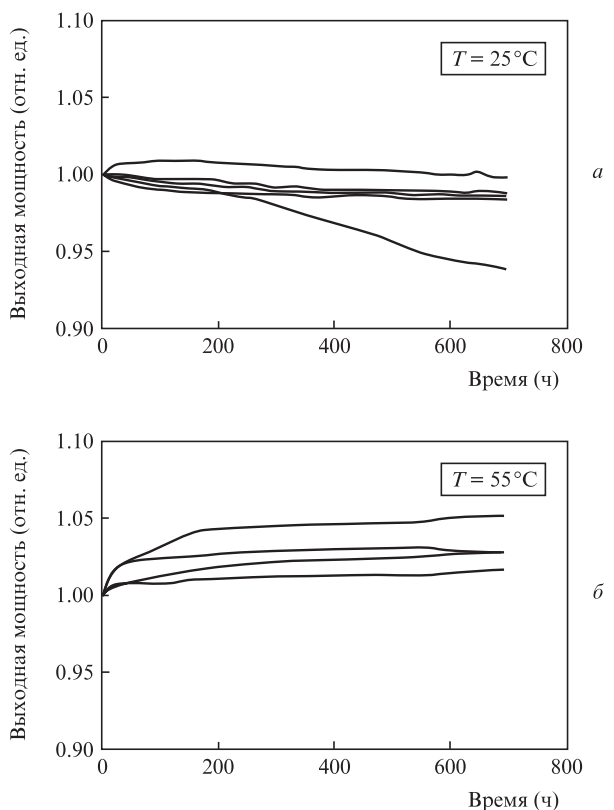


Рис.3. Пример хронограмм выходной оптической мощности  $P_{FS}(t)$  однотипных СЛД из одной ОГЭС в режиме АКТ при 25 и 55 °С.

одинаковых по конструкции СЛД из одной ОГЭС, прошедших предварительную наработку и подвергнутых испытаниям в режиме АКТ при температурах 25 °С и 55 °С и токе инжекции, соответствующем выровненным спектральным максимумам ( $\Delta S = 0$ ) при 25 °С. При комнатной температуре (рис.3,а) эти СЛД «стареют», а при повышенной (рис.3,б) «молодеют» – выходная мощность со временем растет.

Приведенные данные указывают на то, что общепринятые методики определения срока службы ЛД [14] для рассматриваемых СЛД непригодны. В указанных методиках отказом прибора считается спад выходной мощности на 50% при испытаниях в режиме АКТ или возрастание тока инжекции на 50% при испытаниях в режиме АКМ. При этом предполагается, что медленная деградация при различных температурах определяется одним физическим механизмом – активацией дефектов, а срок службы  $\tau$  подчиняется соотношению Аррениуса

$$\frac{\tau(T_1)}{\tau(T_2)} = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right], \quad (1)$$

где  $T_1, T_2$  – рабочие температуры;  $k$  – постоянная Больцмана;  $E_a$  – энергия активации, составляющая для ЛД десятки доли электронвольта. Такой подход позволяет проводить ускоренные ресурсные испытания при повышенных температурах и достаточно уверенно оценивать срок службы высоконадежных ЛД, процесс деградации которых при комнатной температуре протекает очень медленно. Этот метод успешно применяется и для некоторых типов СЛД [15, 16].

Ввиду непригодности такого подхода для наших условий мы ограничились ресурсными испытаниями СЛД-чипов при температуре 25 °С. По восемь типичных образцов из каждой новой ОГЭС, прошедших предварительную наработку, подвергались испытаниям в течение 3000 ч в режиме АКТ при токе  $I_0$ . Перед началом испытаний измерялись основные параметры СЛД, а именно: рабочее напряжение  $U_0$ , выходная оптическая мощность в свободное пространство  $P_{FS}$ , выходная оптическая мощность через одномодовый волоконно-оптический световод (ОВС) с эталонной торцевой микролинзой  $P_{SM}$ , медианная длина волны излучения  $\lambda$ , спектральная полуширина  $\Delta\lambda$ , глубина спектрального провала SF, глубина остаточной модуляции спектра модами Фабри–Перо Rip. Эти измерения повторялись через 1000, 2000 и 3000 ч испытаний при неизменном токе инжекции. Кроме того, определялось новое значение  $I_0$  и измерялись новые значения указанных выше параметров. При этом также измерялась величина  $\Delta S$  и рассчитывался срок службы  $\tau_p$  (методика его определения обсуждается ниже). В табл.1, представляющей собой фрагмент базы данных, содержатся результаты измерений параметров одного активного элемента, прошедшего испытания. Строки 1001, 2001 и 3001 содержат результаты измерений при новых значениях  $I_0$ .

В дальнейшем в соответствии с рекомендациями [14] при входном контроле ОГЭС предполагается проводить параллельные ресурсные испытания при повышенной температуре.

### 3. Результаты ресурсных испытаний

Таким испытаниям в течение двух лет были подвергнуты 27 партий образцов, изготовленных из ОГЭС, которые были получены из гетероструктур, выращенных в шести однотипных процессах газотранспортной эпитаксии из металлоорганических соединений (МО CVD). На рис.4 представлены типичные временные зависимости  $P_{FS}(t)$ ,  $\Delta S(t)$  и  $I_0(t)$ . Вид зависимостей, представленных на рис.4,а, характерен для образцов СЛД типов II–IV. В ходе их старения наблюдается медленное снижение выходной мощности и проседание коротковолнового спектрального максимума ( $\Delta S < 0$ ). У образцов типа V выходная мощность растет вплоть до конца испытаний. Такое поведение нельзя назвать аномальным – оно было характерно

Табл.1. Результаты измерений параметров СЛД S009-129R в ходе ресурсных испытаний (фрагмент базы данных). Условия испытаний: АКТ, 119 мА, 25 °С.

Время (ч)	Дата измерения	$I$ (мА)	$U_0$ (В)	$P_{FS}$ (мВт)	$P_{SM}$ (мВт)	$\lambda$ (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	SF (%)	$\Delta S$ (%)	Rip (%)	$\tau_p$ (ч)
0	22.01.10	119	1.777	8.90	4.78	841.4	45.8	14.5	0	0.3	
1000	07.03.10	119	1.776	8.11	4.39	841.6	45.5	14.5	-5	0.3	7100
1001	07.03.10	120	1.777	8.31	4.50	841.5	45.8	13.5	0	0.3	
2000	24.04.10	119	1.766	7.41	4.05	842.5	44.9	19.0	-13	0.3	5700
2001	24.04.10	123	1.771	8.29	4.57	841.7	45.9	15.0	0	0.3	
3000	05.06.10	119	1.768	6.93	3.77	843.0	44.7	21.5	-18	0.4	13200
3001	05.06.10	125	1.777	8.18	4.53	841.8	46.1	14.5	0	0.4	



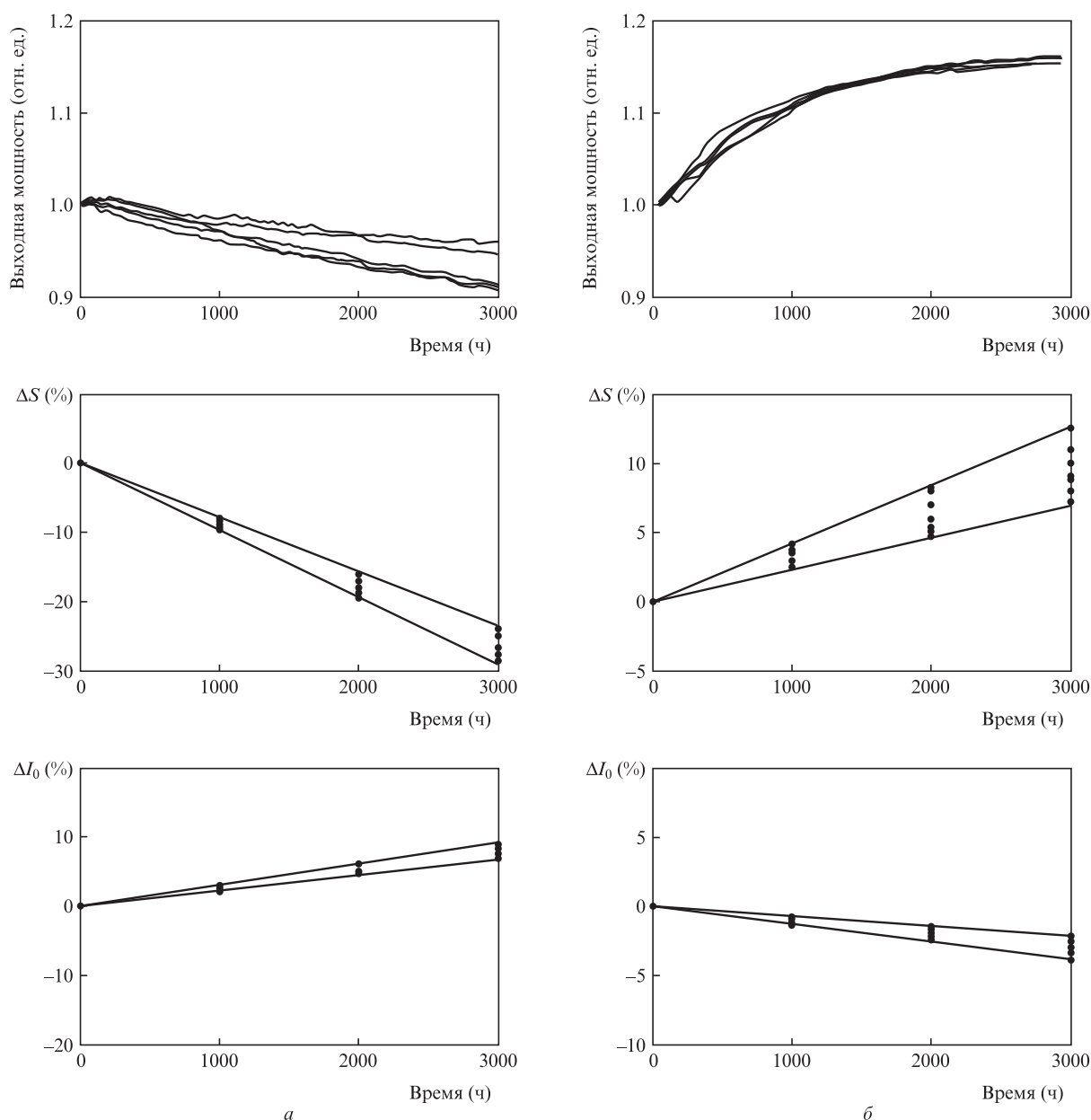


Рис.4. Типичные зависимости  $P_{FS}(t)$ ,  $\Delta S(t)$  и  $\Delta I_0(t)$  для СЛД типов II–IV (а) и типа V (б).

для 14 партий образцов из 27. При этом с увеличением времени наработки увеличивалась деформация либо в длинноволновую, либо в коротковолновую (рис.4,б) сторону спектра.

После сглаживания и линейной экстраполяции зависимостей  $P_{FS}(t)$  оценивался «мощностный» срок службы  $\tau_p$  каждого образца. Для образцов, характеризующихся монотонным спадом выходной мощности во времени, использовался общепринятый критерий отказа:

$$P_{FS}(\tau_p) = \frac{1}{2} P_{FS}(0). \quad (2)$$

Для образцов, демонстрирующих в ходе испытаний рост мощности, был введен «симметричный» критерий отказа:

$$P_{FS}(\tau_p) = \frac{3}{2} P_{FS}(0). \quad (3)$$

Такой подход оправдан тем, что во всех спецификациях на модули серии SLD-37, использующиеся в ОКТ, содержатся ограничения сверху на выходную мощность, связанные, в частности, с мерами лазерной безопасности. Следует отметить, что определяемое таким образом значение  $\tau_p$  является лишь оценочным. Отжиг любых дефектов рано или поздно должен прекратиться. После этого начнется снижение выходной мощности со скоростью, определяемой доминирующим механизмом старения. Другими словами, зависимость  $P_{FS}(t)$  может пройти через максимум при  $P_{FS} < 1.5 P_{FS}(0)$ . Реальное время жизни прибора может оказаться как больше, так и меньше оценочного, определенного линейной экстраполяцией при  $t = 3000$  ч. Для двух партий образцов типа V, прошедших наработку в течение 3000 ч, после измерения их параметров ресурсные испытания были продолжены. На момент написания настоящей статьи они проработали уже более 7000 ч (без малого год), и их выходная мощность продолжает расти. В табл.2 приведены средние значения

Табл.2. Средние «мощностные» сроки службы для образцов типа V из двух ОГЭС, полученные линейной экстраполяцией  $P_{FS}(t)$  при  $t = 2000, 3000, 5000$  и  $7000$  ч.

Номер ОГЭС	$\tau_p$ (ч) при наработке в течение			
	2000 ч	3000 ч	5000 ч	7000 ч
V-1387	20000	24500	60000	94400
V-1514	38000	58000	310000	351000

$\tau_p$  по критерию (3), полученные при  $t = 2000, 3000, 5000$  и  $7000$  ч.

Вероятнее всего, оценка  $\tau_p$  при  $t = 3000$  ч является надежной оценкой снизу. Испытания продолжаются.

Со «спектральным» сроком службы  $\tau_s$  дело обстоит сложнее. Какие-либо общепринятые критерии его определения отсутствуют. Зависимость  $\Delta\lambda(\Delta S)$ , представленная на рис.1,б, подсказывает, что было бы разумным в качестве критерия отказа ввести соотношение

$$|\Delta S(\tau_s)| = 40\%. \quad (4)$$

Действительно, когда  $\Delta S$  превышает 40%, значение  $\Delta\lambda$  начинает быстро уменьшаться. При использовании данного критерия «спектральное старение» оказывается основным фактором, ограничивающим срок службы СЛД. Это иллюстрирует гистограмма, представленная на рис.5,а. Для 22 из 27 исследованных ОГЭС средний «спектральный» срок службы меньше, чем «мощностный», определенный по критериям (2) или (3). При этом у большинства из них  $\tau_p$  превышает  $\tau_s$  в несколько раз.

По восемь образцов из четырех ОГЭС параллельно с ресурсными испытаниями в режиме АКТ проходили наработку в течение 3000 ч в режиме АКМ. Сравнительный анализ результатов показал, что при этом средний «спектральный» срок службы увеличился приблизительно в два раза. Средние значения  $\tau_s$  составили 7400, 12700, 22600, 31300 ч для режима АКТ и 16200, 22400, 46100, 55800 ч для режима АКМ. Но и в этом режиме деформация спектра остается доминирующим фактором, ограничивающим срок службы.

Для практических применений, в которых допустима подстройка рабочего тока инжекции в процессе эксплуатации СЛД, спектральный срок службы может быть значительно увеличен. Сравнение зависимостей  $P_{FS}(t)$ ,  $\Delta S(t)$  и  $I_0(t)$ , приведенных на рис.4, показывает, что при продолжительной работе в режиме АКТ относительные изменения выходной мощности и рабочего тока значительно меньше, чем относительная деформация спектра. Срок службы можно увеличить, если через определенные интервалы непрерывной работы (допустим, 5000 или 10000 ч) устанавливать новое значение  $I_0$ , соответствующее максимальной ширине спектра ( $\Delta S = 0$ ) или производить такую подстройку автоматически. Как было указано выше, во всех спецификациях на рассматриваемые СЛД величина  $I_0$  ограничена сверху. Обширная статистика показывает, что для подавляющего большинства образцов предельное значение  $I_0$  после предварительной наработки превышает его реальное значение на 20%–40%. Исходя из этого можно ввести такой критерий «спектрального» отказа, как невозможность выровнять спектр (обеспечить  $\Delta S = 0$ ) при изменении рабочего тока в пределах  $\pm 20\%$ . То есть

$$|\Delta I_0(\tau_s)| = 20\%. \quad (5)$$

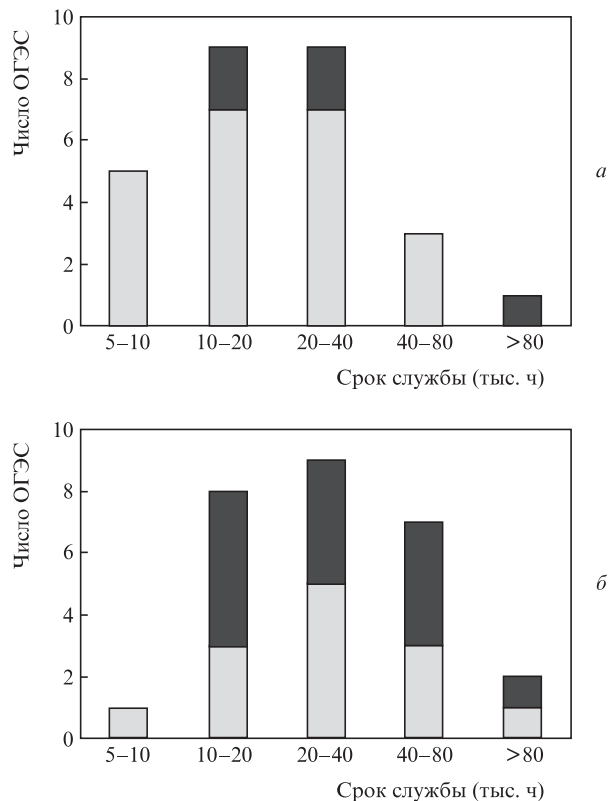


Рис.5. Гистограммы ожидаемого срока службы СЛД из различных ОГЭС ( $\tau = \min[\tau_p, \tau_s]$ ) при использовании для определения  $\tau_s$  критерия (4) (а) и критерия (5) (б). Светлые прямоугольники –  $\tau_s < \tau_p$ , темные прямоугольники –  $\tau_s > \tau_p$ .

На рис.5,б представлена гистограмма ожидаемого среднего срока службы СЛД из тех же ОГЭС, полученная с использованием критерия (5). Сравнение гистограмм, приведенных на рис.5,а и б, показывает, что использование этого критерия позволяет эффективнее использовать ресурс СЛД – заметно повысить средний срок службы и, в частности, значительно снизить процент «короткоживущих» образцов со сроком службы  $\tau$  менее 10000 ч (с 18,5% (5 образцов из 27) до 3,7% (1 из 27)) и увеличить процент «долгожителей» с  $\tau > 40000$  ч (с 14,8% (4 из 27) до 33% (9 из 27)). Кроме того, при этом значения  $\tau_s$  и  $\tau_p$  сближаются. Если при использовании критерия (4) отношение числа ОГЭС с  $\tau_s < \tau_p$  к числу ОГЭС с  $\tau_s > \tau_p$  составляет 22 : 5, то при использовании критерия (5) оно равно 13 : 14.

Полученные данные позволяют оценить дисперсию срока службы образцов из различных ОГЭС. Типичные среднеквадратичные отклонения  $\tau$  от ее средних значений, равных примерно 15, 30 и 50 тыс. ч, составили около 3, 8 и 20 тыс. ч соответственно.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования показали, что большая часть приборов, успешно прошедших предварительную наработку, обладает ожидаемым сроком службы свыше  $10^4$  ч. Экспериментально продемонстрировано, что при неизменных условиях работы в режимах АКТ или АКМ «спектральное старение» (деформация спектра выходного излучения) является основным процессом, ограничивающим срок службы СЛД. Последний может быть значительно увеличен, если условия применения прибора допускают эпизодическую (или автоматическую) подстройку

тока инжекции в режиме АКТ или выходной мощности в режиме АКМ. Использованная методика ресурсных испытаний позволяет проводить селекцию ОГЭС по ожидаемому сроку службы изготавливаемых из них СЛД в зависимости от режима эксплуатации последних.

Результаты настоящей работы способствует повышению конкурентоспособности светоизлучающих модулей серии SLD-37. Авторы выражают признательность многочисленным пользователям этих приборов, а также А.Т.Семенову и В.Р.Шидловскому за инициирование и обсуждение результатов проведенных исследований. Работа частично поддержана Федеральным агентством по образованию (проект 2.1.1.12404).

1. Drexler W., Fujimoto J.G. *Optical Coherence Tomography* (Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2008).
2. Semenov A.T., Batovrin V.K., Garmash I.A., Shidlovski V.R., Shramenko M.V., Yakubovich S.D. *Electron. Lett.*, **31** (4), 314 (1995).
3. Батоврин В.К., Гармаш И.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Любарский А.В., Плявенек А.Г., Сафин А.Ф., Семенов А.Т., Шидловский В.Р., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996).
4. Костин Ю.О., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **39** (5), 421 (2009).
5. Елисеев П.Г. *Квантовая электроника*, **13** (9), 1749 (1986).
6. Eliseev P.G. *Reliability Problems of Semiconductor Lasers* (New York: Nova Sci. Publ. Inc., 1991).
7. Fukuda M. *Reliability and Degradations of Semiconductor Lasers and LEDs* (Boston, VF: Artech House, 1991).
8. Waters R.G. *Progress Quantum Electron.*, **15** (1), 153 (1991).
9. Eliseev P.G. *Progress Quantum Electron.*, **20** (1), 1 (1996).
10. Jimenes J. *Physique*, **4**, 663 (2003).
11. Мифтахутдинов Д.Р., Богатов А.П., Дракин А.Е. *Квантовая электроника*, **40** (7), 583 (2009).
12. Semenov A.T., Shidlovski V.R., Shidlovski D.R. *Proc. IEEE*, **3860**, 488 (1999).
13. Лобинцов П.А., Мамедов Д.С., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (2), 111 (2006).
14. *Reliability Assurance for Optoelectronic Devices, Telcordia Generic Requirements GR-468-CORE* (Telcordia Technol. Inc., Issue 2, 2004).
15. Chao D., Ma J., Li X. *Proc Int. Conf. Reliability Maintainability and Safety (ICMRS)* (Chingdu, 2009, p. 1263).
16. Wang L., Li X., Jiang T., Wan B. *Proc Int. Conf. Reliability Maintainability and Safety (ICMRS)* (Chingdu, 2009, p. 1313).