

# Исследование характеристик излучения маломощных суперлюминесцентных диодов в диапазоне температур $-55^{\circ}\text{C} \dots +93^{\circ}\text{C}$

Д.С.Мамедов, В.В.Прохоров, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович

*Исследованы основные физические характеристики суперлюминесцентных диодов спектрального диапазона 800–850 нм в температурном интервале  $-55^{\circ}\text{C} \dots +93^{\circ}\text{C}$  при уровне выходной мощности порядка 0.1 мВт. Показана возможность создания на их основе миниатюрных малоэнергетических светоизлучающих модулей, способных работать в широком диапазоне температур без термостабилизации активного элемента.*

**Ключевые слова:** суперлюминесцентный диод, светоизлучающий модуль, температурные зависимости выходной мощности, спектра и поляризации.

## 1. Введение

Суперлюминесцентные диоды (СЛД), удачно сочетающие в себе известные достоинства светоизлучающих и лазерных диодов, находят в настоящее время множество применений в различных областях науки и техники, нуждающихся в широкополосных источниках оптического излучения. Это, в первую очередь, волоконно-оптические датчики различных типов, включая гироскопы. Очень перспективным является использование СЛД в качестве источников излучения в таких областях, как оптическая томография, интерферометрия «белого света», оптическая рефлектометрия, где основное требование к источнику излучения заключается в совмещении высокой яркости и широкого спектра (низкой когерентности).

Для стабилизации мощностных, спектральных и поляризационных характеристик излучения, а также для повышения надёжности приборов образцы СЛД в светоизлучающих модулях обычно монтируются на специальный микроохладитель (термоэлектрический элемент Пельтье), что позволяет поддерживать температуру диода в процессе эксплуатации постоянной (обычно  $20^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ ). Типичный светоизлучающий модуль на основе СЛД с выходной мощностью в единицы или десятки милливатт имеет объем 2–3 см<sup>3</sup>, а его энергопотребление при экстремальных температурах может достигать 5 Вт. При этом собственное энергопотребление СЛД составляет всего около 0.3 Вт.

Для многих оптических датчиков уровень выходной мощности порядка 0.1 мВт является достаточным. Наряду с этим для устройств, эксплуатируемых в полевых условиях, ключевыми становятся массогабаритные характеристики и энергопотребление модуля. Немаловажную роль играет и снижение его стоимости. По этим причинам создание миниатюрных маломощных СЛД-модулей, способных работать в широком диапазоне температур без термостабилизации активного элемента, яв-

ляется весьма актуальным. В настоящей работе исследованы основные физические характеристики экспериментальных образцов таких излучателей в диапазоне температур  $-55^{\circ}\text{C} \dots +93^{\circ}\text{C}$ .

## 2. Экспериментальные образцы и методика измерений

Для изготовления образцов СЛД были использованы двухсторонние (GaAl)As-гетероструктуры с отдельным ограничением (РО ДГС), выращенные методом газотранспортной эпитаксии из металлоорганических соединений. Боковое ограничение обеспечивалось изготовленной методом ионного травления мезаструктурой с шириной  $w = 4$  мкм и высотой около 2 мкм. Как известно, при создании СЛД используются различные методы подавления положительной обратной связи по излучению: нанесение просветляющих покрытий на торцы диода, наклонное расположение активного канала (прямого или искривленного) по отношению к торцевым граням, использование многосекционных структур с поглощающими участками, разупорядочивание оптического волновода на участках, прилегающих к торцам, а также различные комбинации указанных методов [1–6].

В настоящей работе для минимизации обратного отражения излучения в активный канал его ось располагалась под углом  $7^{\circ}$  относительно нормали к торцам кристалла. Кроме того, на обе торцевые грани наносились диэлектрические просветляющие покрытия ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$  либо  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с коэффициентом отражения по мощности  $R < 1\%$ . Конфигурация активного канала СЛД приведена на рис.1. Оценка показывает, что для данной конструкции коэффициент отражения излучения в канал усиления не превышает 0.01 %.

Длина активного канала  $L_a$  может варьироваться в достаточно широких пределах, что даёт дополнительную возможность оптимизации выходных характеристик СЛД. В данной работе использовались СЛД с  $L_a = 600$  и  $1000$  мкм.

Образцы СЛД изготавливались из РО ДГС (толщина активного слоя 250 Å, толщины волноводных слоёв 0.12 мкм) с длиной волны электролюминесценции в спект-

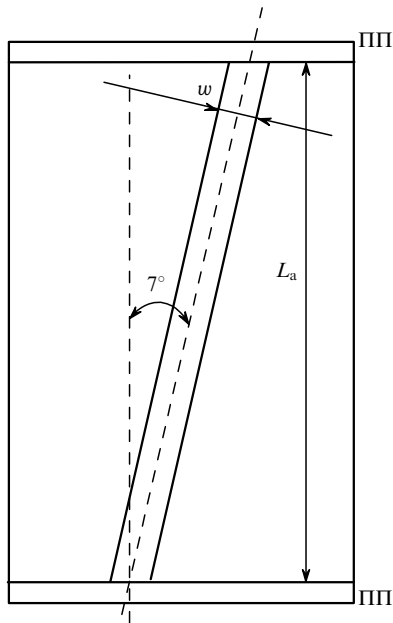


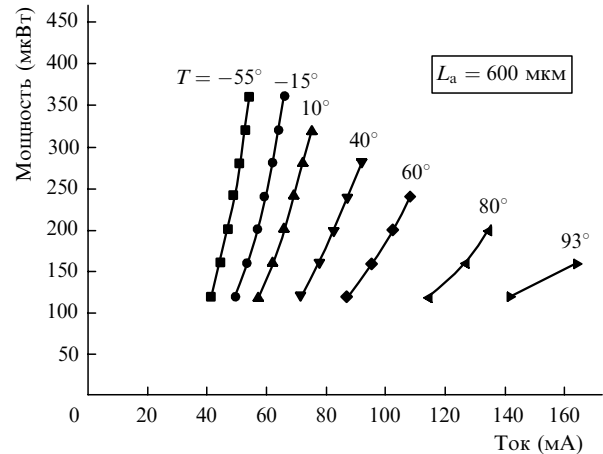
Рис.1. Конфигурация СЛД (ПП – просветляющее покрытие).

ральном диапазоне 800–840 нм, которые ранее использовались для изготовления серийных СЛД-модулей, хорошо зарекомендовавших себя при работе в условиях термостабилизации ( $T = +25^\circ\text{C}$ ) с точки зрения надёжности (большой наработки), стабильности выходных характеристик и их воспроизводимости от образца к образцу.

Экспериментальные модули имели объем менее  $0.4\text{ см}^3$ . Вывод излучения производился через одномодовые волоконные световоды (изотропные или анизотропные с сохранением поляризации). Внутри корпуса модуля, имеющего необходимые электрические выводы, монтировались СЛД на теплопроводе, стыковочный узел с торцевой волоконной микролинзой и миниатюрный пленочный терморезистор. После юстировки и фиксации волокна корпус прибора герметично запаивался.

При проведении измерений температурных зависимостей образцы приборов помещались в температурную камеру Mini SubZero MC-81, при этом волоконные световоды выводились наружу через специальные теплоизолированные отверстия. В качестве исследуемого диапазона температур был выбран диапазон от  $-55^\circ\text{C}$  до  $+93^\circ\text{C}$ , что является вполне достаточным для большинства практических применений СЛД. Модули внутри камеры монтировались на массивном хладопроводе, собственный термодатчик камеры использовался для грубой установки температуры. Точное значение температуры внутри корпусов модулей контролировалось с помощью встроенных термисторов.

Ток инжекции СЛД задавался стабилизированным источником постоянного тока. Измерения выходной оптической мощности производились измерителем мощности ILX OMM-6810B, при этом во всём диапазоне температур проводились поправки на смещение центральной длины волны излучения СЛД, для чего у каждого прибора в каждой температурной точке с помощью оптического анализатора спектра ANDO AQ6317B регистрировался спектр излучения. При измерениях степени поляризации выходное излучение направлялось на поляризатор (призму Глана) с коллимирующей линзой на входе.

Рис.2. Ватт-амперные характеристики СЛД при различных температурах  $T$  ( $L_a = 600\text{ мкм}$ ).

### 3. Экспериментальные результаты

Результаты измерений температурных зависимостей мощности излучения для нескольких исследованных образцов представлены на рис.2–4. Анализ типичного семейства ватт-амперных характеристик (рис.2) показывает, что с ростом температуры при постоянном токе инжекции мощность излучения уменьшается. Это является вполне закономерным, учитывая увеличение с ростом температуры эффекта теплового гашения и уменьшение коэффициента усиления для оптических переходов между локализованными состояниями. Качественно такой вид семейства ватт-амперных характеристик повторяется для всех исследованных образцов с  $L_a = 600$  и  $1000\text{ мкм}$ .

На рис.3 представлены семейства ампер-температурных зависимостей, где параметром каждой кривой является определённая постоянная выходная мощность излучения, для образцов с  $L_a = 600$  и  $1000\text{ мкм}$ . Хорошо видно, что функции  $I(T)$  при  $P = \text{const}$  имеют более сильную температурную зависимость для образца с  $L_a = 600\text{ мкм}$ , чем аналогичные кривые для образца с  $L_a = 1000\text{ мкм}$ .

Хотя детальные расчёты температурных зависимостей мощностных параметров излучения СЛД в данной работе не проводились, на основании простых теоретических моделей можно сделать некоторые выводы относительно наблюдаемых закономерностей. Вообще говоря, количественное описание оптического усиления, спектральной плотности скорости спонтанного испускания и спектральной плотности мощности основывается на знании зонной структуры и матричных элементов оптических переходов. В предположении независимости концентрации носителей заряда от координаты и равенства нулю коэффициентов отражения на торцевых гранях излучателя можно получить выражение для спектральной плотности фотонов на выходе СЛД [7]:

$$\varphi_\alpha(\hbar\omega) = \frac{(\Gamma/c_{gr})R_{sp}^{(\alpha)}(\hbar\omega)}{\Gamma G_\alpha(\hbar\omega) - \alpha_0} [\exp\{\{\Gamma G_\alpha(\hbar\omega) - \alpha_0\}L_a\} - 1], \quad (1)$$

где индекс  $\alpha$  отвечает модам ТЕ- или ТМ-поляризации;  $\Gamma$  – фактор оптического ограничения;  $c_{gr}$  – групповая скорость света;  $R_{sp}^{(\alpha)}$  – спектральная плотность скорости спонтанного испускания;  $G_\alpha(\hbar\omega)$  – коэффициент усиления

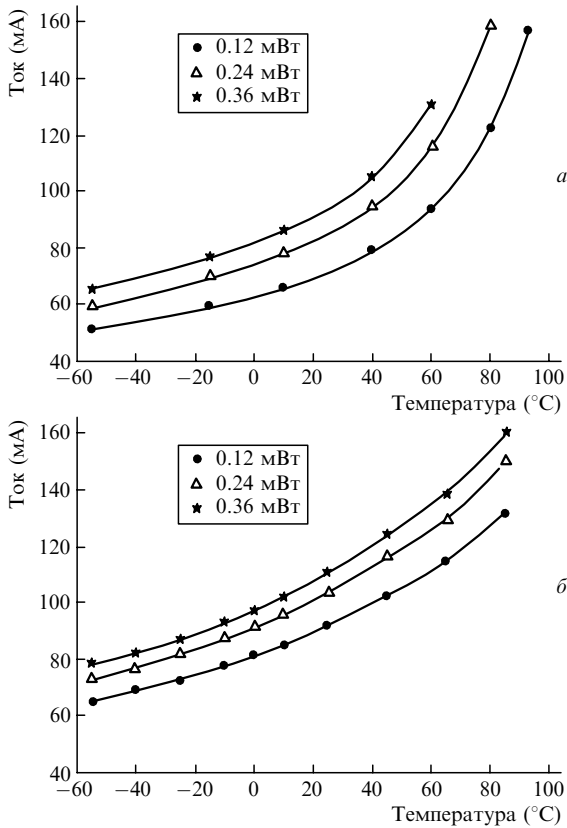


Рис.3. Температурные зависимости токов инжекции, соответствующих постоянной выходной мощности;  $L_a = 600$  (а) и  $1000$  мкм (б).

ния для оптических переходов между локализованными состояниями;  $\alpha_0$  – внутренние потери.

С увеличением температуры СЛД доля вынужденного излучения уменьшается (коэффициент  $G_x(\hbar\omega)$  уменьшается с температурой, следовательно, уменьшается степень экспоненты в (1)), а доли спонтанного излучения и волноводных потерь  $\alpha_0$  увеличиваются. Таким образом, более слабая зависимость  $I(T)$  будет наблюдаться при условиях  $\Gamma G_x(\hbar\omega) \gg \alpha_0$  и  $\exp\{\Gamma G_x(\hbar\omega) - \alpha_0\} L_a \gg 1$ , соответствующих преобладанию вынужденного излучения. Эти условия легче выполнить для излучателей с большой длиной активного канала. В противном случае, когда спонтанное излучение дает значительный вклад в выходную мощность, рассматриваемая зависимость будет более резкой.

Следует отметить, что вид зависимостей, представленных на рис.3, достаточно хорошо воспроизводится от образца к образцу. Так, из более чем 50 исследованных излучателей с  $L_a = 600$  мкм только у двух был обнаружен «аномальный» вид зависимостей  $I(T)$  в области низких температур (рис.4). Такое аномальное поведение диодов (описывается кривыми 2 и 3) может быть связано как с аномальным поведением диаграммы направленности излучения СЛД при низких температурах [8, 9], так и с неоптимальной юстировкой его активного канала относительно волоконной микролинзы в стыковочном узле. Следует отметить, что область низких температур является наиболее чувствительной с точки зрения требований к поддержанию заданного уровня выходной мощности. С понижением температуры крутизна ватт-амперных характеристик СЛД сильно возрастает (см. рис.2), т. е. малым изменениям тока инжекции соответствуют значительные изменения выходной мощности. При использо-

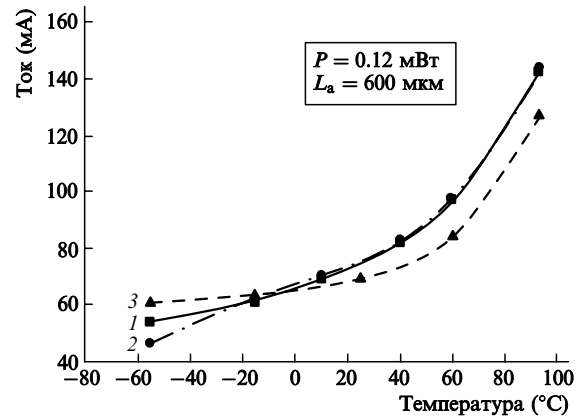


Рис.4. Типичная (1) и «аномальные» (2,3) зависимости  $I(T)$  трех диодов с  $L_a = 600$  мкм при  $P = 0.12$  мВт.

вании СЛД-модулей в устройствах с петлей обратной связи для поддержания постоянного уровня выходной мощности наличие аномальных зависимостей  $I(T)$  при  $P = \text{const}$  не представляет опасности. Если же эта зависимость в соответствующем блоке управления аппроксимируется некоторым заданным законом (например, параболическим), то использование аномальных модулей недопустимо.

Об изменении соотношения вкладов спонтанного и вынужденного излучения, обсуждаемых выше, свидетельствуют и температурные зависимости спектральной полуширины линии спектра, представленные на рис.5: спектральная полоса сужается с уменьшением температуры, что связано с большим усилением (и соответственно с большей долей вынужденного излучения) при низких температурах.

На рис.6 представлены температурные зависимости поляризационных характеристик выходного излучения модулей с одномодовым изотропным волокном и волокном типа PANDA, сохраняющим поляризацию. У модулей первого типа вид зависимостей отношения мощностей в ТЕ- и ТМ-поляризациях от температуры практически не воспроизводится от образца к образцу. Их общей особенностью является увеличение  $P_{TE}/P_{TM}$  с ростом выходной мощности, что характерно и для самих СЛД. Что же касается большого разброса вида зависимостей  $P_{TE}/P_{TM}(T)$ , то его, по-видимому, можно объяснить механическими напряжениями, обусловленными температурой, которые возникают в стыковочном узле. В ре-

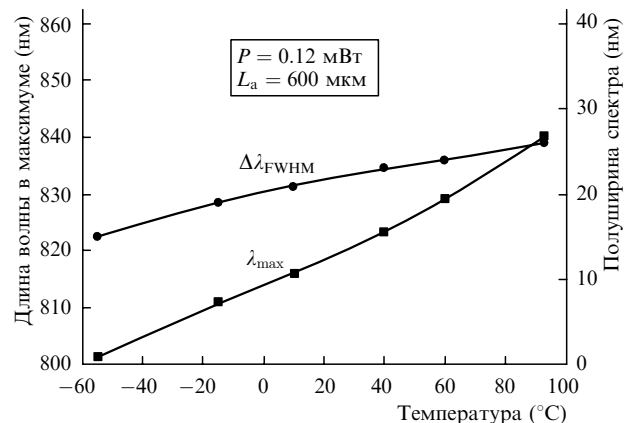


Рис.5. Типичные температурные зависимости максимума спектра  $\lambda_{\text{max}}$  и полуширины спектра  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$  СЛД ( $L_a = 600$  мкм).

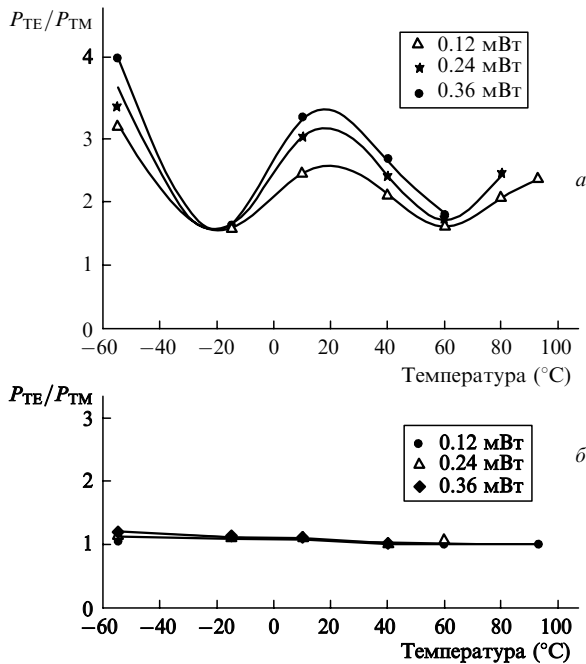


Рис.6. Температурные зависимости отношения мощности излучения в ТЕ- и ТМ-поляризациях для модулей с изотропным (а) и анизотропным (б) выходными волоконными световодами при различных уровнях выходной мощности.

зультате волокно перестает быть изотропным и становится поляризационно-чувствительным, что сильно сказывается на соответствующих характеристиках выходного излучения.

В модулях с анизотропным одномодовым волокном типа PANDA можно получить в процессе юстировки деполаризованное выходное излучение. Как показали проведённые эксперименты, излучение таких модулей остается практически деполаризованным (степень поляризации менее 10 %) во всем исследованном диапазоне температур (рис.6,б).

#### 4. Заключение

Выполненные нами исследования с полной определенностью указывают на возможность создания нового семейства светоизлучающих модулей на основе СЛД. Эти миниатюрные и малоэнергоёмкие приборы (максимальная потребляемая мощность около 0.3 Вт) с выходной мощностью излучения через одномодовое волокно порядка 0.1 мВт будут работоспособны в экстремально широком температурном диапазоне без использования термостабилизации активного элемента. Проблема надежности этих приборов нуждается в отдельном исследовании. Для аналогичных СЛД в условиях эксплуатации в составе термостабилируемых модулей продемонстрировано в [9] и регулярно подтверждается медианное время жизни более  $10^5$  ч. В данном случае срок службы будет сильно зависеть от условий эксплуатации, поскольку механизмы старения СЛД, как и всех оптоэлектронных приборов, имеют активационный характер. В условиях постоянной работы при предельно высоких температурах можно ожидать снижения срока службы более чем на порядок. В противоположной ситуации (при экстремально низких температурах) срок службы может превысить  $10^6$  ч.

Авторы выражают признательность А.Т.Семенову и М.Келлеру за внимание к данной работе. Исследования выполнены в рамках Проекта № 00113377 по заказу фирмы LITEF GmbH.

1. Wang C.S., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 587 (1982).
2. Dutta N.K., Deimel P.P. *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 496 (1983).
3. Alphonse G.A., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 2454 (1988).
4. Kwong N.S.K., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 696 (1989).
5. Tateoka K., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 1568 (1991).
6. Takayama T., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 1981 (1996).
7. Батоврин В.К. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 113 (1996).
8. Semenov A.T., et al. OFS'11 Post Deadline Papers, Sapporo (1996).
9. Shidlovski V.R., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3860**, 495 (1999).
10. Semenov A.T., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3860**, 488 (1999).