

КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Новые оптические передающие модули высокой надежности на основе мощных суперлюминесцентных диодов спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм

Д.Р.Сабитов, В.Н.Светогоров, Ю.Л.Рябоштан, М.А.Ладугин,
А.А.Мармалюк, М.Г.Васильев, А.М. Васильев, Ю.О.Костин, А.А.Шелякин

Созданы светоизлучающие модули спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм на основе гетероструктуры AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами в новых уменьшенных корпусах с термостабилизацией. Проверена их работоспособность в предельных режимах эксплуатации. Изучена надежность таких модулей и устойчивость при воздействии климатических факторов.

Ключевые слова: суперлюминесцентный диод, квантовая яма, компенсация упругих напряжений, AlGaInAs/InP, волоконно-оптический гироскоп.

1. Введение

Суперлюминесцентные диоды (СЛД) применяются в качестве источников излучения в таких областях техники, как оптическая когерентная томография, тестирование оптических элементов и систем, волоконные датчики и волоконно-оптические гироскопы, газоанализаторы, телекоммуникации и многие другие [1]. Такое распространение они получили благодаря удачному сочетанию высокой яркости и широкого спектра излучения, а также простоте управления выходными характеристиками и удобству применения в оптических схемах.

Спектральный диапазон 1.5–1.6 мкм актуален для большинства из этих применений, однако создание СЛД-источников, излучающих в данном диапазоне, сопряжено с дополнительными сложностями: для гетероструктур, на основе которых создаются такие СЛД, характерна более интенсивная оже-рекомбинация, а следовательно, ниже уровень выходной мощности и сильнее температурная зависимость последней. Использование упругих напряжений в квантовых ямах активной области полупроводниковых излучателей позволяет ослабить указанное негативное воздействие оже-рекомбинации [2].

В работе [3] сообщается о создании мощных СЛД на основе двойных гетероструктур раздельного ограничения (РО-ДГС) в системе материалов AlGaInAs/InP с на-

пряженно-компенсированными квантовыми ямами. Реализация в миниатюрных корпусах без термостабилизации [4] показала возможность применения таких источников в волоконно-оптических гироскопах в широком температурном диапазоне и с приемлемой надежностью. Однако для ряда применений требуются более высокие мощности излучения, а это, в свою очередь, требует увеличить уровень плотности тока накачки и использовать конструкцию модуля, позволяющую термостабилизировать кристалл СЛД.

Традиционно для таких задач используется корпус формата DBUT, в который, помимо кристалла СЛД и юстировочного узла, монтируются термистор и термоэлектрический микроохладитель для контроля и управления температурой стабилизации. При этом для многих применений (в частности, для волоконно-оптических гироскопов) актуальным является уменьшение габаритных размеров и массы приборов. В данной работе мы предлагаем использовать новый корпус, призванный реализовать те же функции оптического модуля при уменьшенных размерах.

Цель настоящей работы – изучение характеристик суперлюминесцентных источников излучения на основе РО-ДГС в системе материалов AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами в новом уменьшенном корпусе с термостабилизацией, а также исследование надежности таких источников.

2. Экспериментальная часть

СЛД формировались на основе РО-ДГС AlGaInAs/InP с напряженно-компенсированными квантовыми ямами и имели конструкцию с прямым наклонным активным каналом, антиотражающими покрытиями граней и клиновидным поглотителем излучения на нерабочем торце кристалла [3].

Кристалл СЛД, узел юстировки с волоконным световодом, термистор и термоэлектрический микроохладитель монтировались в корпус новой конструкции, напоминающий стандартный корпус DBUT, однако имеющий уменьшенные габариты (рис.1). Использование нового

Д.Р.Сабитов, В.Н.Светогоров, Ю.Л.Рябоштан, М.А.Ладугин. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3
e-mail: d.sabitov@siplus.ru

А.А.Мармалюк. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; Российский университет дружбы народов, Россия, 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

М.Г.Васильев, А.М.Васильев, Ю.О.Костин, А.А.Шелякин. Институт общей и неорганической химии им. Н.С.Курнакова РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 31

Поступила в редакцию 16 мая 2023 г., после доработки – 22 сентября 2023 г.

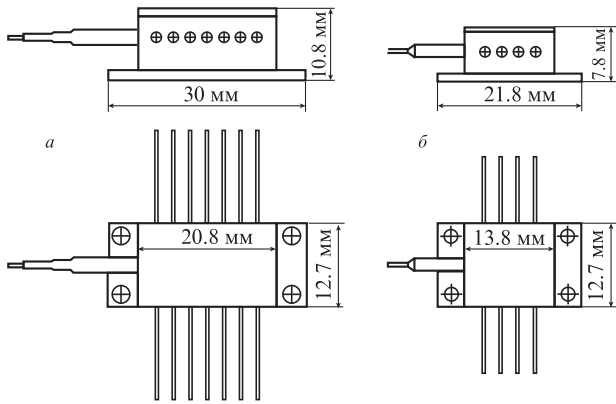


Рис.1. Схематическое изображение стандартного корпуса DBUT (а) и нового корпуса (б).

корпуса позволило также более чем вдвое снизить массу модуля.

Полученные оптические модули, помимо измерения выходных характеристик, подвергались различным испытаниям. Испытания на сохраняемость проводились методом ускоренной оценки сохраняемости в трех форсированных режимах: 1) при пониженной температуре окружающей среды -45°C – 96 ч; 2) при повышенной температуре окружающей среды $+65^{\circ}\text{C}$ – 96 ч; 3) при повышенной влажности воздуха – 95% при температуре $+40^{\circ}\text{C}$ – 96 ч. После этого модули подвергались тестам на воздействие изменения температуры окружающей среды. Применялись два метода: термошоки (модули попеременно выдерживались в камерах с температурой стабилизации -45°C и $+65^{\circ}\text{C}$, продолжительность воздействия температуры в каждой камере 30 мин, время переноса модулей между камерами до 1 мин) и термоциклы (модули выдерживались в камере с периодически изменяемой от -45°C до $+65^{\circ}\text{C}$ температурой окружающей среды, продолжительность выдержки на предельных значениях температур 1 ч, скорость изменения температуры между этими режимами $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$).

Модули выдерживались в соответствующих условиях без электрической нагрузки. Термошоки и термоциклы применялись сериями, после каждой серии испытаний осуществлялась проверка параметров излучения.

С изменением конструкции корпуса и, следовательно, теплового сопротивления между кристаллом СЛД и крепежным фланцем модуля стало актуальным определение предельных пониженной и повышенной рабочих температур. Для этого модуль был установлен на массивный медный радиатор и помещен в камеру тепла и холода, а подключение организовано так, чтобы контролировать ток накачки СЛД, фактическую температуру стабилизации модуля (сопротивление встроенного термистора) и ток элемента Пельтье, обеспечивающий такую стабилизацию. Измерения проводились при различных внешних температурах и уровнях накачки с целью подтвердить диапазон рабочих температур для новых модулей.

Испытания на долговечность проводились ускоренным методом [5]. Модули устанавливались на массивный радиатор в камеру с температурой $+50^{\circ}\text{C}$, элементы Пельтье не включались. Ток накачки кристалла СЛД составлял 300 мА. В таком режиме температура кристаллов составляла около $+70^{\circ}\text{C}$. Регистрировались значения мощности излучения модулей и средние значения сопротивления термистора для коррекции показаний.

3. Результаты и их обсуждение

Наибольший интерес при изменении конструкции корпуса представляет выяснение допустимых режимов эксплуатации и изучение надежности СЛД-модуля в этом корпусе, в том числе в различных климатических условиях. В рамках данной работы были проведены испытания на сохраняемость при различных условиях, тесты работы на повышенных и пониженных температурах, испытания на воздействие смены температур, а также ускоренные испытания долговечности СЛД-модулей.

По результатам климатических испытаний изменений внешнего вида модулей не отмечено. Результаты воздействия изменения температуры окружающей среды на выходную мощность трех образцов оптических модулей представлены на рис.2. Такая сохраняемость и устойчивость к климатическим факторам уже вполне достаточна для промышленных применений.

На рис.3 показаны зависимости тока термоэлектрического элемента от температуры окружающей среды при различных уровнях накачки кристалла СЛД и, соответственно, тепловой нагрузки на холодильник. Видно, что даже при токе накачки 300 мА величина тока через элемент Пельтье далека от предельной, которая для данного охладителя составляет 1.8 А. Таким образом, конструкция модулей позволяет термостабилизировать кристалл

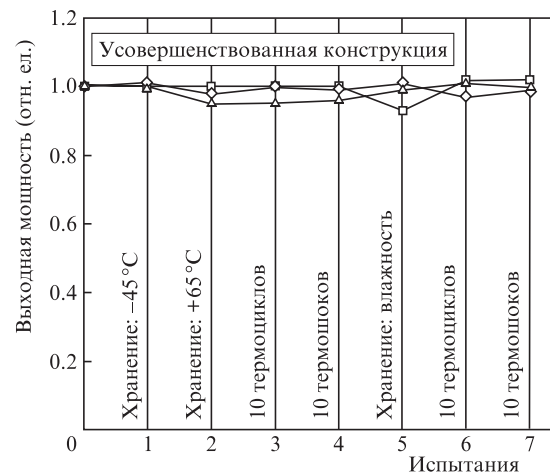


Рис.2. Изменение мощности излучения оптических модулей в ходе тестов на воздействие климатических факторов.

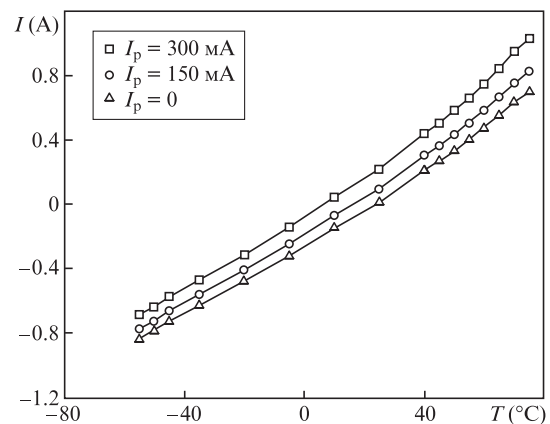


Рис.3. Зависимость тока микроохладителя, необходимого для термостабилизации кристалла СЛД при $+25^{\circ}\text{C}$ при различных токах накачки, от температуры в камере.

СЛД при +25°C во всем диапазоне внешних температур (от -55°C до +75°C).

Ниже приведены типичные параметры излучения исследуемых оптических модулей в рабочем режиме (T_{stab} – температура стабилизации кристалла СЛД, I_{SLD} – ток накачки СЛД, U_{SLD} – падение напряжения на СЛД, P_{SM} – мощность излучения в одномодовом волоконном световоде, λ – медианная длина волны спектра излучения, $\Delta\lambda$ – полуширина спектра по уровню -3 дБ).

T_{stab} (°C)25
I_{SLD} (mA)	300
U_{SLD} (В)	1.6
P_{SM} (мВт)	4.5
λ (нм)	1545
$\Delta\lambda$ (нм)52

Для ускорения деградационных процессов в кристаллах СЛД и юстировочных узлах модулей при испытаниях на долговечность термостабилизация чипов отключалась. Таким образом, температура кристаллов в ходе испытаний определялась температурой окружающей среды и саморазогревом в рабочем режиме. Контроль фактической температуры кристаллов обеспечивался регистрацией значений сопротивления термистора СЛД-модуля.

Влияние изменения температуры на мощность излучения приборов компенсировалось при расчетах следующим образом. В течение короткого времени (нескольких часов) температура окружающей среды плавно изменялась в пределах 68°C–72°C, при этом записывались значения термистора СЛД-модуля и выходной мощности. Выяснилось, что в этих температурных пределах зависимость мощности от сопротивления термистора линейная с очень хорошей корреляцией (рис.4). В дальнейшем при построении хронограмм ресурсных испытаний (рис.5) показания корректировались в соответствии с этой зависимостью. Таким образом, полученные кривые отображали изменение мощности именно вследствие деградации чипа и юстировочного узла, а изменение мощности из-за нестабильности температуры исключалось из рассмотрения. Испытания в течение 2000 ч показали, что температура кристаллов поддерживается в диапазоне 68.5°C–70.5°C. Как можно видеть из рис.4 и 5, даже такая небольшая нестабильность температуры вызывает большее изменение мощности, чем деградационные процессы в исследуемых СЛД, поэтому учет влияния темпе-

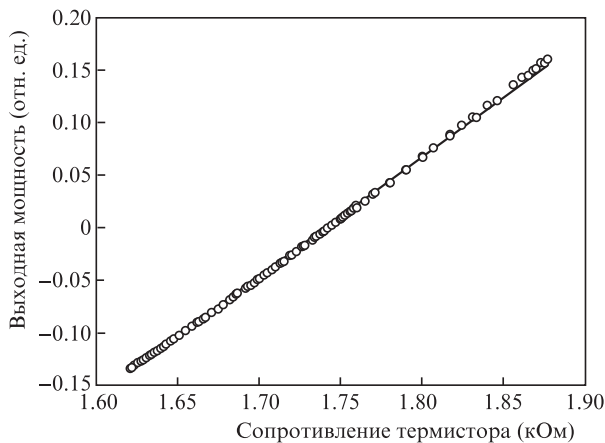


Рис.4. Изменение мощности исследуемого СЛД-модуля вследствие флуктуаций температуры.

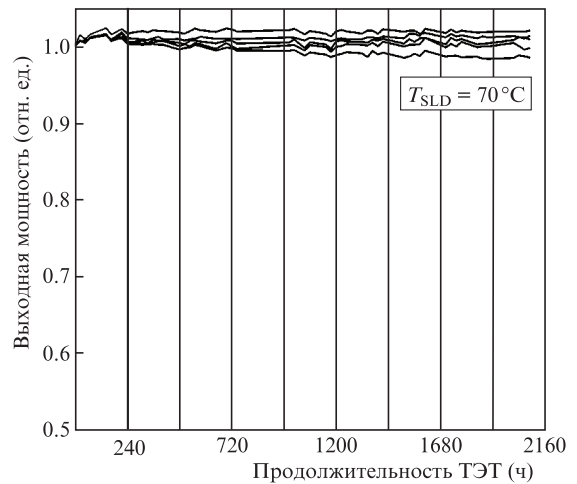


Рис.5. Хронограммы термозлектротренировки передающих модулей на основе СЛД.

ратурыкратно повысит точность предсказания ресурса путем экстраполяции хронограмм мощности.

Поскольку ни один прибор за время тестов не отказал, мы рассчитали линейную экстраполяцию этих хронограмм, исключив данные за первые 240 ч, в течение которых характер кривых не установился. Аппроксимирующие прямые получились разнонаправленными: из пяти образцов два показали тенденцию к медленному росту мощности во время тренировки. К такому поведению может приводить отжиг дефектов гетероструктуры, ответственных за безызлучательную рекомбинацию в активной области, или отжиг дефектов, ответственных за рост оптических потерь в активном канале. Снижение концентрации таких дефектов обуславливает увеличение дифференциальной эффективности СЛД и способствует повышению мощности излучения при том же токе накачки.

Такое поведение полупроводниковых излучателей на начальных стадиях термозлектротренировки – не редкость [6, 7]. За стадией роста выходной мощности следует стадия ее снижения, по динамике которой и определяют ожидаемый срок службы приборов [8]. На сегодняшний день можно с уверенностью утверждать только, что за 2000 ч тренировки при температуре окружающей среды +50°C (температура кристаллов +70°C) отказов не наблюдается, а максимальный аппроксимированный темп снижения мощности составляет $(9.8 \pm 0.7) \times 10^{-6}$ отн.ед./ч. Таким образом, при сохранении темпов деградации даже худший образец покажет ресурс более 50000 ч при температуре кристалла +70°C. Коэффициент режима K_m , учитывающий ускорение деградационных процессов вследствие влияния рабочего тока и температуры приборов при ускоренных испытаниях, в соответствии с [9] рассчитывается по формуле

$$K_m = \left(\frac{I_{fav}}{I_{fav0}} \right)^m \frac{\exp E_a}{k} \left(\frac{1}{t_{j0} + 273} - \frac{1}{t_j + 273} \right),$$

где I_{fav0} – средний прямой ток излучателя в номинальном режиме; I_{fav} – средний прямой ток излучателя в рабочем режиме; t_{j0} – температура р–п-перехода в номинальном режиме (°C); t_j – температура р–п-перехода в рабочем режиме (°C); $E_a = 0.6$ эВ – энергия активации процесса деградации; $k = 8.617 \times 10^{-5}$ эВ/град – постоянная Больцмана;

m – показатель, зависящий от свойств полупроводникового кристалла.

В нашем случае ток накачки при испытаниях равен номинальному, поэтому вклад в ускорение процессов деградации вносит только экспонента, отражающая закон Аррениуса. В номинальном режиме работы элементы Пельтье будут обеспечивать термостабилизацию кристалла при $+25^\circ\text{C}$, следовательно, коэффициент K_m принимает значение 21.

Итак, ресурс худшего из исследованных образцов в номинальном режиме при термостабилизации кристалла при 25°C составит более миллиона часов. Очевидно, что исследованные модули имеют большой потенциальный срок службы, но его прогнозное значение не может быть определено на основе имеющихся данных. В настоящее время термоэлектротренировка продолжается, о ее результатах будет сообщено позднее. Также представляют интерес испытания приборов в новых корпусах на воздействие механических внешних факторов, таких как вибрации и удары, что станет темой следующей работы.

4. Заключение

Разработан и исследован передающий модуль на основе СЛД с напряженно-компенсированными квантовыми ямами AlGaInAs/InP в новом миниатюрном корпусе с термостабилизацией.

Оптический модуль позволяет получать около 4.5 мВт постоянной мощности излучения в волоконном световоде, при этом типичная медианная длина волны спектра излучения составляет 1545 нм, а полуширина спектра – 52 нм. Характеристики нового миниатюрного корпуса позволяют термостабилизировать кристаллы СЛД при такой нагрузке в диапазоне внешних температур от -55°C до $+75^\circ\text{C}$.

Модули усовершенствованной конструкции выдержали испытания на воздействие экстремальных температур, влажности и смену внешней температуры без заметных изменений выходных параметров.

Испытания на долговечность проводились ускоренным методом при температуре кристалла $+70^\circ\text{C}$ в течение более 2000 ч. За этот период не было зарегистрировано ни одного отказа, а максимальное падение мощности излучения составило около 1.5%. Мощность излучения части образцов продолжала медленно расти, что может быть объяснено отжигом дефектов гетероструктуры. Оценка ожидаемого срока службы требует продолжения ресурсных испытаний, но для образца с наибольшей скоростью деградации выходной мощности ресурс оценивается в более чем миллион часов при номинальном режиме эксплуатации.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований и программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (договор № 02.a03.21.0005).

1. Rossetti M., Napierala J., Matuschek N., Achatz U., Duell M., Vélez C., Castiglia A., Grandjean N., Dorsaz J., Feltin E. *Proc. SPIE*, **8252**, 825208 (2012).
2. Андреев А.Д., Зегря Г.Г. *ФТП*, **31**, 358 (1997) [*Semiconductors*, **31**, 297 (1997)].
3. Сабитов Д.Р., Рябоштан Ю.Л., Светогоров В.Н., Падалица А.А., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Васильев М.Г., Васильев А.М., Костин Ю.О., Шелякин А.А. *Квантовая электроника*, **50**, 830 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 830 (2020)].
4. Сабитов Д.Р., Светогоров В.Н., Рябоштан Ю.Л., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Васильев М.Г., Васильев А.М., Костин Ю.О., Шелякин А.А. *Квантовая электроника*, **52**, 577 (2022) [*Quantum Electron.*, **52**, 577 (2022)].
5. Wang L., Li X., Jiang T., Wan B. *Proc. 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety* (Chengdu, China, 2009), pp 1313–1317.
6. Li B., Craig R., Gignac W.J., Huang Zhe, Zucker E. *Proc. SPIE*, **2148**, 137 (1994).
7. Лобинцов П.А., Мамедов Д.С., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36**, 111 (2006) [*Quantum Electron.*, **36**, 111 (2006)].
8. Елисеев П.Г., Кочетков А.А. *Квантовая электроника*, **10**, 2118 (1983) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **13**, 1415 (1983)].
9. *Надежность электрорадиоизделий: Справочник* (М.: МО РФ, 2006).