Ильченко Степан Николаевич

Суперлюминесцентные диоды и полупроводниковый оптический усилитель повышенной мощности и широкополосности и приборы на их основе

05.27.03 – Квантовая электроника

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,

профессор

Якубович Сергей Дмитриевич

МОСКВА 2016 г.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Новые СЛД повышенной мощности и широкополосности	37
Введение	37
1.1 СЛД повышенной мощности и надёжности с центральной длиной	
волны излучения 670 нм.	38
1.2 Широкополосные СЛД диапазона 800 – 900 нм с колоколообразной	
формой спектра	45
1.3 СЛД ближайшего ИК-диапазона с двугорбой формой спектра	
шириной до 100нм.	60
1.4 Пространственно - одномодовые СЛД с центральными длинами волн	
790 нм, 840 нм, 960 нм, 1060 нм с непрерывной выходной оптической	
мощности до 100 мВт	67
Глава 2 Новые комбинированные источники сверхширокополосного	
излучения «ближайшего» ИК – диапазона спектра но основе	
разработанных СЛД	. 77
Введение.	77
2.1 Комбинированные источники света с колоколообразной формой	
спектра BroadLighter-860-G.	82
2.2 BroadLighter-880-MP	86
Глава 3. Широкополосный ПОУ-модуль с центральной длиной волны	
1060 нм и быстроперестраиваемый лазер на его основе	94
Введение	94
3.1 Оптико-физические характеристики ПОУ бегущей волны на основе	
наногетероструктуры с активными слоями состава In _{0.35} Ga _{0.65} As	94
3.2 Быстроперестраиваемый лазер на основе разработанного ПОУ и	
акустооптического фильтра во внешнем кольцевом оптоволокном	
резонаторе 1	105
Приложение 1	111
П.1 Спецификации на приборы, разработанные в рамках данной	
диссертационной работы 1	111
П.2 СЛД – модули с центральной длиной волны 1300 нм, работоспособные	
при температуре окружающей среды от -55 °С до +125 °С 1	119
Заключение 1	123
Сокращения и условные обозначения 1	126
Обозначения переменных 1	127
Литература 1	128

Введение

История создания и развития полупроводникового инжекционного лазера берет свое начало в 1962 году через несколько лет после первой демонстрации генерации когерентных электромагнитных колебаний в оптическом диапазоне, что явилось началом развития квантовой электроники. Генерация света, вызванная инжекцией тока высокой плотности через *p-n* переход GaAs, была впервые продемонстрирована в нескольких разных научно-исследовательских центрах практически в одно и тоже время, но потребовалось почти 18 лет прежде чем началось массовое производство полупроводниковых лазеров (ПЛ), как дешевых и компактных приборов.

Характеристики ПЛ постоянно совершенствуются. Основными вехами истории их развития являются: создание первых лазерных диодов (ЛД) на основе p-n перехода в монокристалле GaAs (гомолазеров), создание ЛД на основе «объемных» гетероструктур и получение непрерывной генерации при комнатной температуре, создание ПЛ на основе слоистых квантоворазмерных гетероструктур и значительное снижение пороговых плотностей тока инжекции, разработка ЛД с активными слоями на основе структур с квантовыми нитями и квантовыми точками, обеспечивающая дальнейшее снижение порога генерации, создание ПЛ с вертикальным резонатором (VCSEL).

Первый этап развития, связанный с выдвижением множества блестящих инженерно-физических идей [1,2], был ознаменован изобретением полупроводникового инжекционного лазера [3,4,5,6]. В принципе переход от светоизлучающего диода к ПЛ достаточно понятен и прост. Для получения лазерной генерации необходимо наличие инверсии населенностей и оптической обратной связи, т. е. резонатора Фабри-Перо. Инверсия населенностей в лазерном диоде (ЛД) может быть достигнута путем сильного легирования *p*- и *n*- областей (имеется в виду гомолазер) и инжекцией высокой плотности электронов и дырок в область перехода, возникающей при прямом смещении диода. Резонатором Фабри-Перо могут служить грани самого полупроводникового монокристалла, сколотого по кристаллографическим плоскостям спайности. В этом заключался основной подход, взятый на вооружение создателями ЛД.

Первые полупроводниковые гомолазеры требовали фантастически высоких плотностей тока инжекции для достижения порога лазерной генерации и, таким образом, они могли работать только в импульсном режиме во избежание катастрофического разрушения, вызванного тепловым разогревом. Криогенное охлаждение и эффективный тепловой контакт с кристаллом лазера были обязательными атрибутами техники гомолазеров, вплоть до 1970 года, когда была получена первая генерация света в непрерывном режиме работы лазера при комнатной температуре. Это стало возможным благодаря разработке технологии гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур [7,8,9,10]. С появлением ПЛ на гетероструктурах (гетеролазеров) начался второй этап в развитии этих источников света, характеризующийся резким повышением эксплуатационной эффективности этих приборов и расширением сферы их применений. Основное отличие ЛД двусторонней гетероструктурой **(ДГС)** С ОТ его предшественника - гомолазера заключается в том, что тонкий активный слой с узкой запрещенной зоной располагался между двумя покровными слоями с более широкой запрещенной зоной. Таким образом, появилась возможность ограничить диффузию носителей заряда и локализовать ИХ В тонком узкозонном усиливающем слое. Наличие градиента показателя преломления в направлении, перпендикулярном плоскости электронно-дырочного перехода, позволило удерживать свет в центральном слое такой структуры, как в оптическом волноводе. В отличие от гомолазеров, в которых относительно слабо выраженный волноводный эффект пространственным определяется распределением легирующих примесей и градиентом концентраций инжектируемых носителей заряда, в гетеролазерах волноводные характеристики можно варьировать в широких пределах при изменении толщин и состава слоев полупроводниковых гетероструктур. Стремление к наилучшему решению проблемы стимулировало дальнейшее развитие технологии производства ПЛ и привело к появлению таких

приборов, как лазер на основе заращенной мезаполосковой структуры, лазер заращенного типа с канавкой в подложке, лазер с гребневидным волноводом и др. [11].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований гетеролазеров с "объемным" активным слоем (в том числе, результаты исследований их спектральных и динамических характеристик излучения) представлены в огромном числе научных публикаций как в нашей стране, так и за рубежом. Среди этого огромного многообразия работ следует выделить следующие монографии и обзорные работы [12,13,14,15,16,17].

Благодаря наличию электронного ограничения в ДГС, лазеры с такой конструкцией стали прямыми предшественниками структур с квантовыми ямами (КЯ), в которых средний узкозонный слой имеет толщину порядка единиц нанометров, что приводит к расщеплению электронных уровней вследствие эффектов размерного квантования. Однако лишь с развитием метода эпитаксиального роста с прецизионным контролем толщины, состава и т.д. (метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [18,19] и газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений (МОС ГФЭ) [20]) стала возможна реализация качественных ДГС со сверхтонкими слоями. Первые результаты проявления эффекта размерного квантования в оптическом спектре гетероструктуры со сверхтонким слоем была продемонстрирована в 1974 году [21]. В 80-е годы успех гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) привлёк много учёных, и были исследованы системы с ещё меньшей размерностью – квантовые нити (КН) и квантовые точки (КТ). В квантовых нитях носители заряда ограничены в двух направлениях, в КТ – «искусственных атомах», носители ограничены уже во всех трёх направлениях и обладают полностью дискретным энергетическим спектром. Первые успешные результаты создания лазеров на КН описаны в работе [22], а создание первых лазеров на КТ описаны в работах [23,24,25].

Вскоре после создания ПЛ началось исследование "безрезонаторных" ЛД, привлекавших к себе внимание в качестве квантовых усилителей бегущей волны

[26]. В этих устройствах усиленное спонтанное излучение (суперлюминесценция) играет негативную роль, а именно, приводит к насыщению усиления и определяет уровень спонтанных шумов, т.е. ограничивает чувствительность и динамический диапазон усилителя.

Физические характеристики полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) хорошо изучены. Их исследованию посвящены сотни публикаций. Среди первых исследований ПОУ бегущей волны следует отметить цикл работ, проведенных под руководством Л.А.Ривлина [27]. В настоящее время ПОУ нашли применение во многих областях техники. Среди них первое место занимают волоконно-оптические системы передачи информации (ВОСПИ). В этих системах ПОУ используются не только для усиления оптических сигналов, но также в качестве модуляторов, логических затворов, переключателей, маршрутизаторов, нелинейных конверторов [28]. Несомненный интерес представляют ПОУ и для систем оптической связи [29,30]. ПОУ ближнего ИК диапазона спектра чаще всего применяются в качестве выходных усилителей мощности различных лазерных систем и В качестве активных элементов одночастотных И перестраиваемых лазеров с внешними спектрально-селективными резонаторами фирма Sacher Lasertechnik выпускает [31]. Например, десятки моделей полупроводниковых В которых перестраиваемых лазеров, используются классические схемы внешнего резонатора Литтмана и Литтроу и ЛД с просветленными гранями в качестве активных элементов. Суммарный диапазон спектральной перестройки этих приборов составляет 630-1740 нм. Полосы перестройки отдельных приборов «ближайшего» ИК-диапазона составляют около 20нм, 30 нм, 40 нм и 50 нм в интервалах 750-800 нм, 800-900 нм, 900-1000 нм и 1000-1100 нм соответственно.

Использование соответствующих полупроводниковых квантоворазмерных гетероструктур позволяет реализовать в указанных спектральных диапазонах полосы оптического усиления шириной порядка 100 нм [32]. Тем не менее, до последнего времени ширина полосы усиления серийно выпускаемых ПОУ-модулей указанных диапазонов не превышала 40-50 нм [33]. При изготовлении широкополосных ПОУ бегущей волны на основе квантоворазмерных гетероструктур необходима оптимизация конструкции активных элементов. Желательно реализовать максимальную ширину полосы оптического усиления и при этом обеспечить достаточно высокий коэффициент однопроходного усиления, умеренный ток инжекции и относительно низкий уровень суперлюминесценции, которая является паразитным фоном.

Сложно переоценить полезность ПЛ и ПОУ. В настоящее время они нашли самое широкое применение в различных областях науки и техники, да и быт человека сегодня трудно представить без применения устройств, действие которых основано на использовании этих источников света. ПЛ и ПОУ используются в системах связи, оптической памяти, обработке материалов, оптической локации, спектроскопии высокого разрешения, аналитической спектроскопии, в частности для обнаружение загрязнения окружающей среды, стандартах частоты, интерферометрии, голографии и в различных областях медицины (диагностика, терапия, хирургия).

Но для некоторых применений, таких как. В первую очередь, оптоволоконные датчики различных типов, включая оптоволоконные гироскопы, специализированные волоконно-оптические линии связи С повышенными требованиями к амплитудным шумам передатчиков, интерферометры "белого света", оптические рефлектометры и томографы сверхвысокого разрешения, основным требованием к источнику излучения является совмещение высокой яркости и широкого спектра (низкой когерентности).

В качестве примера кратко рассмотрим принцип работы одной из систем оптической когерентной томографии (ОКТ), где широкополосность источника излучения является ключевым фактором получения сечений полупрозрачных объектов с высокой точностью бесконтактным методом. Пучок света в ОКТ, как показано на Рис. В.1, делится на два: сканирующий, который взаимодействует с исследуемым объектом, и опорный. При взаимодействии этих пучков света

(отраженного от объекта и опорного) наблюдается интерференционная картина, но только лишь в том случае, если оптическая разность хода этих пучков не будет превышать длины когерентности. При изменении положения опорного зеркала получается распределение коэффициента отражения в исследуемом объекте. Участкам исследуемого объекта с большим коэффициентом отражения будет соответствовать более интенсивная интерференция. Однако, при превышении оптической разницы хода пучков длины когерентности, интерференции не будет совсем. Таким образом, длина когерентности определяет аксиальное разрешение метода. Полученное таким образом распределение видности интерференционной картины от координаты (так называемый А-скан) содержит информацию о расположении и поперечных размерах неоднородностей в исследуемом объекте. Изображения сечения (В-скан) объекта вычисляется по результатам серии А-сканов. В некоторых методах возможно также получить трёхмерное изображение объекта.



Рис. В.1. Схема установки классической ОКТ. Здесь 1 – низкокогерентный источник света, 2 – делитель пучка, 3 – опорное зеркало, 4 – сканирующее зеркало, 5 – образец, 6 – фотодетектор, 7 – вывод данных.

Подобный дизайн был использован в ОКТ с применением микроскопов с низкой числовой апертурой для получения изображения исследуемых биологических образцов *in vivo*, а также для применения в хирургии [34,35,36].

Ранние исследования «безрезонаторных» ЛД в качестве источников излучения, привели к появлению так называемых суперлюминесцетных диодов (СЛД), которые базировались на GaAs - гомоструктурах [37,38]. Позднее были созданы промышленные образцы СЛД на основе ДГС. СЛД, совмещающие в себе ряд достоинств инжекционных лазеров и светодиодов, являются оптимальными источниками излучения для ряда практических применений описанных выше. [39,40,41].

Прежде чем перейти к описанию принципа действия и основных СЛД, характеристик рассмотрим другие существующие источники широкополосного излучения. По принципу действия их можно разделить на типов: ламповые источники «белого света» несколько на основе ламп накаливания газоразрядных ламп, твердотельные пикосекундные И И фемптосекундные лазеры, обладающие относительно большой мощностью (до единиц Ватт усреднённой по времени мощности) и широким спектром (сотни [42, 43, 44],являющиеся нанометров) полупроводниковые светодиоды И источниками собственного (спонтанного) излучения. Описание принципа работы данных приборов не относится к теме данной диссертации, но для сравнения стоит рассмотреть их преимущества и недостатки.

Ламповые источники «белого света» на основе ламп накаливания и газоразрядных ламп обладают самым широким спектром излучения, который ближней может «накрывать» весь диапазон длин волн, начиная с ультрафиолетовой области и заканчивая областью инфракрасного (ИК) излучения. Подобная ширина не наблюдается ни у одного из вышеперечисленных типов приборов. Кроме того, излучение таких источников деполяризовано, приборы абсолютно не чувствительны к оптической обратной связи. Также стоит отметить их сравнительно низкую цену. К серьёзным недостаткам ламповых

источников можно отнести их высокое энергопотребление, низкую яркость, крайне низкий ввод излучения в волокно (типичные значения мощности из одномодового волокна не превышают нескольких микроватт). Помимо всего прочего, подобные приборы обладают большими габаритами. Все эти факторы резко ограничивают возможность практического использования ламповых источников для вышеуказанных целей.

К преимуществам импульсных субпикосекундных твердотельных лазеров следует отнести возможность получения широкого спектра излучения, достигающего нескольких сот нанометров, и большой мощности и яркости излучения. Но высокая стоимость, большие габариты, негладкая форма спектра, высокие шумы интенсивности, ограниченность набора спектральных диапазонов делают использование на практике таких приборов не всегда выгодным и рациональным.

К преимуществам полупроводниковых светодиодов стоит отнести, возможность их создания в широком диапазоне длин волн излучения, характерном для полупроводниковых структур (330 - 1800 нм). Эти приборы обладают широкой спектральной полосой спонтанного излучения (до 170 нм), спектр которого ограничивается лишь распределением носителей заряда в валентной зоне и зоне проводимости, характерным для данных конфигурации и состава активных слоев полупроводниковой структуры, температуры и плотности тока инжекции. Помимо вышеперечисленного, полупроводниковые светодиоды имеют малые размеры и низкую стоимость. Но при этом малая яркость, низкая эффективность ввода излучения в оптическое волокно, сильные температурные зависимости как мощностных, так и спектральных параметров излучения резко возможности практического использования ограничивают светодиодов В вышеуказанных областях.

Теперь, рассмотрев альтернативные источники излучения, можно более детально продемонстрировать преимущества и недостатки суперлюминесцентных диодов и светоизлучающих приборов на их основе.

Как было указано выше, основным и уникальным в своём роде свойством СЛД является комбинация выходной мощности лазерного диода и ширины оптического спектра светодиода. Такое сочетание становится возможным благодаря широкому спектру усиления и высокому оптическому усилению в соединениях групп $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$ и $A^{IV}B^{VI}$. К примеру InP, InAs, InSb, CdS, CdTe, PbTe, PbSe и наиболее распространённый GaAs.

По существу традиционный СЛД является оптимизированным лазерным усилителем бегущей волны с нулевыми коэффициентами отражения на торцах активного канала. Количественное описание контура оптического усиления и спектральной плотности скорости спонтанного испускания основывается на знании зонной структуры и матричных элементов оптических переходов. Для описания состояния носителей тока в квантоворазмерных СЛД используется метод эффективной массы [45], который широко применяется для расчёта КРС. Коэффициент усиления $G(\hbar\omega)$ для оптических переходов между локализованными состояниями можно вычислить как [46]:

$$G(\hbar\omega) = \frac{8\hbar\omega}{n\hbar cL_{w}} \sum_{l,m} \int_{0}^{\infty} dkk \left| M_{lm}(k) \right|^{2} \times \{f_{c}[E_{l}(k)] - f_{v}[E_{m}(k)]\} L[E_{l}(k) - E_{m}(k) - \hbar\omega]^{2}$$
(B.1)

где $E_l(k)$ и $E_m(k)$ – энергии *l*-й подзоны в зоне проводимости и m-й подзоны в валентной зоне; $f_c f_v$ – функции распределения Ферми в зоне проводимости и валентной зоне, функция $L(E - \hbar \omega)$ описывает уширение спектральной линии, $|M_{lm}(k)|^2$ – квадрат матричного элемента, выражающийся через огибающие волновых функций (ψ_l, ψ_m).

При описании спектров суперлюминесценции используются скоростные уравнения для спектральной плотности фотонов, распространяющихся в положительном и отрицательном направлении вдоль волновода, которые в стационарном режиме записываются в следующем виде:

$$\frac{d\varphi^{(+)}}{dy} = \left[\Gamma G_{\alpha}(\hbar\omega) - \alpha_0\right] \varphi^{(+)} + \frac{\Gamma}{c_g} R_{sp}, \qquad (B.2)$$

$$\frac{d\varphi^{(-)}}{dy} = \left[\Gamma G_{\alpha}(\hbar\omega) - \alpha_0\right] \varphi^{(-)} - \frac{\Gamma}{c_g} R_{sp}, \qquad (B.3)$$

где Γ - фактор оптического ограничения, α_0 – внутренние потери, c_g – групповая скорость света, R_{sp} – спектральная плотность скорости спонтанного излучения:

$$R_{sp} = \frac{4\beta(\hbar\omega)^{3}n}{\hbar^{4}\pi^{2}c^{3}L_{w}}\sum_{l,m}\int_{0}^{\infty}dkk \left| M_{lm}(k) \right|^{2}f_{c}[E_{l}(k)] \times \{1 - f_{v}[E_{m}(k)]\}L[E_{l}(k) - E_{m}(k) - \hbar\omega], \qquad (B.4)$$

параметр *β* описывает долю спонтанно испускаемых фотонов, дающих вклад в моды волновода.

В предположении независимости концентрации носителей от координаты и равенства нулю коэффициентов отражения на торцевых гранях из уравнений В.3 и В.4 можно получить спектральную плотность фотонов на выходе СЛД:

$$\varphi_{\alpha}(\hbar\omega) = \frac{(\Gamma/c_g)R_{sp}(\hbar\omega)}{\Gamma G_{\alpha}(\hbar\omega) - \alpha_0} \left\{ \exp\left\{ \left[\Gamma G_{\alpha}(\hbar\omega) - \alpha_0 \right] L_a \right\} - 1 \right\}.$$
(B.5)

Также можно заметить, что мощность СЛД зависит от оптического усиления экспоненциально, а от уровня спонтанного излучения линейно. Очевидно, что для получения большей выходной мощности излучения требуется большое оптическое усиление.

Основными параметрами, описывающими спектр излучения СЛД являются:

• Центральная, пиковая или медианная длины волн. ($\lambda_c \lambda_p \lambda_m$)

Полуширина спектра Δλ – параметр, равный ширине спектра взятой на половине его высоты. Этот параметр определяет длину когерентности L_c.

• Глубина остаточной спектральной модуляции модами Фабри-Перо, обусловленной неидеальностью (ненулевым отражением) граней СЛД.

Ширина спектра излучения в первую очередь зависит от ширины спектра Традиционные СЛД с «объемным» усиления. активным слоем имеют колоколообразную, слегка ассиметричную, близкую к гауссовой, форму спектра. Эти СЛД на основе двусторонней гетероструктуры (GaAl)As с раздельным ограничением (РО ДГС) с поперечно-одномодовым активным каналом шириной в единицы микрометров при выходной оптической мощности в десятки милливатт обладают шириной спектра излучения 15-20 нм в диапазоне 800 нм и до 30-40 нм для длин волн 1300 и 1550 нм (InGaAsP). Так как увеличение ширины спектра является одной из актуальных задач, спектр «объемных» СЛД пытались уширить и были предложены несколько вариантов конструкции, например, «слоеный» СЛД с двумя активными слоями с различным составом. Но реальный прогресс начался после успешной демонстрации СЛД на базе структур с квантовыми ямами [47].

Использование гетероструктур с одной или несколькими квантовыми ямами или говоря по-другому однослойными и многослойными квантоворазмерными гетероструктурами (ОКРС и МКРС соответственно) немного искажают, но зато позволяют значительно уширить спектр усиления, что увеличивает полуширину спектра излучения. Уширение спектра усиления происходит благодаря высокой плотности состояний в квантоворазмерной гетероструктуре по сравнению с «объемными» гетероструктурами при тех же плотностях носителей [47]. Когда в выходное излучение дают вклад переходы из различных энергетических подзон в активных слоях, то возникает дополнительное уширение спектра. [48,49]. Например, в наиболее распространенных ОКРС на базе AlGaAs возможны переходы из двух состояний зоны проводимости. Возможность значительного

уширения спектра для более длинноволновых МКРС была впервые показана в работе [50]. Ширина такого спектра может достигать 100 нм. Недостатком этих СЛД является двугорбая форма спектра далекая от гауссовой, обуславливающая наличие «пьедестала» у центрального максимума автокорреляционной функции (АКФ), что негативно сказывается на соотношении сигнал-шум. Рис. В.2. Демонстрирует типичные спектры СЛД с колоколообразной (шириной ~20нм) и двугорбой (шириной ~50нм) формами спектра.



Рис. В.2 Спектры СЛД с колоколообразной (сплошная линия) и двугорбой (пунктир) формами спектра

Степень когерентности излучения принято описывать автокорреляционной функцией (АКФ) поля световой волны Е:

$$\gamma(\tau) = \int_{l} E(t)E^{*}(t+\tau)dt \, , \qquad (B.6)$$

измеряемой по зависимости видности интерференционной картины от разницы хода Δl в симметричном интерферометре ($\tau = l/c$). АКФ может быть определена и расчётным путём [51]:

$$\gamma(\tau) = \frac{\int_{v} \varphi(v) \exp(-2\pi i v\tau) dv}{\int_{v} \varphi(v) dv},$$
(B.7)

где $\varphi(v)$ – спектральная плотность.

Для многих применений, низкокогерентной В частности ДЛЯ интерферометрии, особенно важна форма и ширина центрального пика функции излучения. Форма автокорреляционной центрального пика В соответствии с В.7 определяется формой огибающей спектральной плотности излучения, а его ширина или длина когерентности, определяется выражением:

$$L_c = k \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} , \qquad (B.8)$$

где λ - центральная длина волны, $\Delta\lambda$ - полуширина спектра и *k* - коэффициент, зависящий от формы спектра излучения (в частности, это 0,32 для лоренцевой и 0,66 для гауссовой формы спектра). Идеальная АКФ представляет из себя один узкий центральный пик, такой АКФ обладает спектр гауссовой формы. Ho реальные спектры имеют асимметричную колоколообразную или двугорбую форму, что приводит появлению К «пьедестала». Также нежелательные пики привносят паразитные спектральные модуляции.

Наиболее распространенным видом таких модуляций являются остаточные модуляции модами Фабри-Перо, появляющиеся вследствие остаточных отражений от торцевых граней кристалла СЛД. В случае малой глубины, амплитуда остаточных модуляций модами Фабри-Перо может быть выражена как:

$$m = 2G\sqrt{(R_{out}R_{back})}, \tag{B.9}$$

где R_{out} и R_{back} эффективные коэффициенты отражения от концов активного канала.

При глубине модуляции спектра в 1-3% вторичные пики функции когерентности имеют относительную интенсивность ~ - 25 ...- 20 дБ. Поскольку

для получения выходной мощности хотя бы в 10 милливатт с грани в поперечно-одномодовом СЛД необходимо усиление G около 30 дБ, для того чтобы глубина спектральной модуляции оставалась В диапазоне 1-3% произведение $R_{out} \cdot R_{back}$ должно не превышать 10^{-10} , а значит 10^{-5} для каждой отражающей грани, что очень сложно получить в полупроводниковых СЛД представляющих собой ЛД с просветлёнными гранями. Впрочем, возможность получить такой коэффициент отражения от просветленной грани кристалла лазерного диода, была показана в работе [52]. На Рис. В.З. представлены типичные АКФ и их центральные пики для колоколообразной и двугорбой формы спектра. На панорамных АКФ хорошо видны пики связанные с паразитным отражением. Также стоит отметить, что центральный пик АКФ для двугорбого спектра хоть и имеет «пьедестал», но при этом в два раза уже, что предпочтительнее для большинства применений.

Уменьшить проблему с нежелательным отражением путём можно оптимизации геометрии СЛД. Для уменьшения коэффициента отражения можно использовать так называемые «наклонные» структуры, в которых активный волновод расположен под углом, отличном от нормального, по отношению к торцевой грани кристалла в СЛД. Другой способ - продолжение активной области СЛД относительно длинным прозрачным участком и/или встроенным поглощающим участком (поглотителем) В конце активного канала. Преобладающее большинство современных СЛД мощных с низким коэффициентом спектральной модуляции основаны на вышеперечисленных принципах, либо на их совокупности [53,54,55,56]. Подобная геометрия в совокупности с антиотражающим покрытием обычно даёт приемлемый результат.



Рис. В.3 АКФ СЛД с колоколообразной (а) и двугорбой (б) формами спектра и их центральные пики (в) (колоколообразная форма - сплошная линия, двугорбая - пунктир).

Коротко рассмотрим другие характеристики СЛД. Оптическое усиление в полупроводниках довольно сильно зависит от рабочей температуры. Так как мощность СЛД экспоненциально зависит от усиления, то она также будет сильно зависеть и от температуры. К примеру, мощность СЛД с длиной волны 680 нм, может уменьшиться в 6 раз при изменении температуры с +15 °C до +50 °C (Рис. В.4).



Рис. В.4 Зависимость выходной мощности от температуры СЛД с центральной длиной волны 680нм на основе МКРС в системе (AlGaIn)(PAs)

Компенсировать этот температурный эффект довольно проблематично, так как плотность тока в СЛД достаточно высокая, из-за чего увеличение тока накачки ведёт к серьёзному уменьшению рабочего ресурса диода. Центральная длина волны и полуширина спектра излучения СЛД также изменяются под действием температуры. Для уменьшения влияния внешней температуры обычно светоизлучающие модули на основе СЛД оснащаются термоэлектрическими микрохолодильниками (ТЭМО) на основе эффекта Пельтье.

Ещё одна важная характеристика СЛД – это его дальнее поле. Обычно его сечение у поперечно одномодового СЛД, представляющего собой ЛД с просветлёнными гранями, имеет эллиптическую форму, оно подобно дальнему полю классического поперечно-одномодового лазерного диода. Однако, как было указано выше, у мощных СЛД активный канал обычно располагается под углом к выходной грани кристалла, что приводит к тому, что сечение дальнего поля приобретает форму серпа (Рис. В.5) [57]. Излучение одной пространственной

моды обеспечивает эффективную стыковку с одномодовым оптоволокном. Ввод излучения может достигать 30%-50% в сферическую торцевую микролинзу линзу и 60-70% в цилиндрическую.



Рис. В.5 Типичное дальнее поле излучения СЛД с наклонным активным каналом (распределение интенсивности в плоскости р-п перехода (а), в перпендикулярной плоскости (б) и сечение пучка (в).

Срок службы любого источника света обычно определяется двумя основными факторами: естественными процессами старения и аккуратностью

эксплуатации. Все СЛД в той же степени что и лазерные диоды являются чувствительными к электростатическим разрядам, перегрузкам от скачков напряжения и тока, перегреву и т.д. Также одной из серьёзных проблем является проблема «скрытых повреждений», которые трудно увидеть с первого взгляда, так как при таких повреждениях рабочие параметры практически не меняются. Но при этом они могут сильно уменьшить время жизни СЛД. Временем жизни или МТТF (median time to failure) обычно называют время эксплуатации, за которое мощность излучения уменьшается на 50% при неизменных токе инжекции и температуре [58].

Если падение оптической мощности происходит резко, после небольшого времени нормальной работы СЛД, то подобный эффект называется «катастрофической» оптической деградацией (КОД). Такой эффект характеризуется появлением дефектов как на гранях, так и внутри активного канала [59]. Повреждение зеркал обычно происходит из-за того, что в ходе работы СЛД, на гранях кристалла возрастает локальная температура вследствие безызлучательной рекомбинации [60,61]. Наиболее же распространённая причина КОД - механические повреждения и напряжения в кристалле.

Второй тип – это так называемая «быстрая» деградация, которая характеризуется постоянным падением мощности в первые сотни часов работы СЛД. Этот эффект связан с наличием протяженных дефектов, разрушающих активную область диода. Их рост представляет типичный процесс распространения дислокаций благодаря взаимодействию точечных дефектов в гетероструктуре и неосновных носителей, внесенных в активный слой электрической накачкой и оптической генерацией при поглощении света внутри резонатора.

Последний тип – это «постепенная» деградация, которая ведет к отказу СЛД при длительной эксплуатации (порядка тысяч часов) и проявляется в снижении квантового выхода. Причиной её является формирование точечных дефектов Время жизни (*MTTF*) при этом обычно подчиняется соотношению Аррениуса:

$$\frac{MTTF(T_1)}{MTTF(T_2)} = \exp\left\{\frac{Ea}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right\},\tag{B.10}$$

где T_1 , T_2 – рабочие температуры, E_a – энергия активации, составляющая для СЛД десятые доли эВ u k – постоянная Больцмана. 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 [62,63].

Физические механизмы, определяющие процесс деградации, ЛД и СЛД разнообразны и определить конкретную причину спада мощности излучения не всегда представляется возможным, к примеру, в обзоре П.Г.Елисеева [64] таких механизмов рассматривается более десятка.

Выше были описаны этапы развития и становления СЛД и их основные свойства, благодаря которым они нашли широкое применение в различных областях оптоэлектроники, при этом являясь наилучшим решением для многих задач. Важность развития и улучшения свойств и характеристик СЛД была понятна ещё на заре их создания в 1971 и актуальна по сей день в связи с растущими потребностями приборов на их основе. Суперлюминесцентные диоды занимают первое место среди их возможных конкурентов по ряду причин, а именно:

- Ширина спектра может достигать сотен нанометров.
- Высокая выходная мощность до сотен милливатт.
- Простой и эффективный ввод излучения в оптоволоконные световоды, в том числе одномодовые (OBC) (30%-50% через сферическую и 60-70% через цилиндрическую линзу)
- Малые габариты чипа (порядка миллиметра) и светоизлучающего модуля (порядка сантиметра) с волоконным выходом.

- Срок службы порядка десятков тысяч часов.
- Сравнительно небольшая стоимость.
- Возможность создания СЛД в различных диапазонах оптического спектра, начиная от 400 нм и до 1800 нм.

Основные типы СЛД, коммерчески доступные на данный момент, кратко описаны ниже:

1. СЛД видимого диапазона.

СЛД видимого диапазона на сегодняшний день обладают скромными мощностями и сравнительно небольшим ресурсом. Рынок таких СЛД почти полностью представлен «красными» излучателями с длиной волны 650-680 нм. В статьях [65,66] были описаны СЛД на базе объемной гетероструктуры с мощностью до 4 мВт и МКРС с мощностью до 15 мВт соответственно. Ширина спектров излучения в обоих случаях составляла менее 10 нм. В 2009 году в работе [67] СЛД были описаны синего диапазона на основе (InGa)N - гетероструктур, но они обладали крайне малым (сотни часов) временем жизни. Мощность представленных на рынке СЛД-модулей рассматриваемого диапазона не превышает 15 мВт и 5 мВт при выводе излучения в открытое пространство и через ОВС соответственно.

2. СЛД диапазона 750 – 900 нм

Данный диапазон представлен самым большим количеством СЛД высокой мощности на основе «объемных» и квантоворазмерных гетероструктур (КРС) в системах (AlGa)As и (InGa)As. В работах [68,69,70] были получены мощности от 100 мВт и до 250мВт, при использовании ненакачиваемых областей структуры вблизи выходных граней кристалла (так называемые «холодные концы») и таких областей. Благодаря эффективному вводу в оптимизации длины цилиндрическую линзу была получена мощность 100мВт из одномодового волокна, что по мощности уже вполне сравнимо с мощными поперечно-одномодовыми ЛД.

В СЛД на базе КРС при оптимизации структуры СЛД и длины активного канала были получены мощности до 100 мВт при ширине спектра излучения 50 нм, но для увеличения времени жизни мощность таких СЛД не поднимают выше 30 мВт. Возможность получения ширины спектра до 100 нм для СЛД на базе однослойных (ОКРС) и многослойных (МКРС) наногетероструктур экспериментально была показана в работах [71,72] соответственно, но они обладают сравнительно небольшим временем жизни. В настоящее время, коммерчески доступны излучатели с шириной спектра не превышающей 60нм и непрерывной выходной мощностью, не превышающей 60мВт в открытое пространство.

Позднее были разработаны СЛД диапазона 820 нм с двугорбой формой спектра шириной более 70 нм и мощностью излучения через OBC от 0.2 до 34 мВт в зависимости от длины активного канала [73]. На основе ДКРС получены СЛД с шириной спектра более 54 нм м мощностью через OBC от 5 до 32 мВт в зависимости от длины активного канала. Также получены СЛД с шириной спектра до 72 нм, с относительно небольшим временем жизни. СЛД диапазона 840 нм с квази-гауссовой формой спектра имеют ширину около 33 нм, при мощности через OBC около 25 мВт, и временем жизни более 10⁴ часов.

3. СЛД ближнего ИК диапазона 900- 1100 нм

В спектральном диапазоне 900- 1100 нм в основном используются СЛД на основе КРС в системе (InGa)As. В ранних работах, например [74], сообщается о СЛД с шириной спектра 25-30 нм и мощностью 100 мВт и шириной 70 нм с мощностью 30 мВт. Позднее, на базе ОКРС, была получена ширина спектра СЛД 100 нм при мощности более 10 мВт из ОВС [75]. Наиболее широкополосные мощные СЛД рассматриваемого диапазона двугорбый имеют спектр. Возможность улучшение мощностных выходных параметров СЛД с центральной длиной волны 980 было продемонстрировано при использовании структур на КТ. Такой СЛД обладал мощностью в открытое пространство до 200 мВт при ширине спектра около 60 нм [76]. Первые СЛД диапазона 1050 нм имели мощность менее

2 мВт из ОВС. Позднее, были получены СЛД этого диапазона с мощностью, достигающей 10 мВт из ОВС [77].

Коммерчески доступные СЛД-модули данного спектрального диапазона обладают шириной спектра излучения до 120 нм и выходной мощностью до 60 мВт в открытое пространство.

4. СЛД диапазона 1300-1600 нм

В настоящее время на оптоэлектронном рынке представлены десятки светоизлучающих модулей на основе СЛД данного спектрального диапазона. Их основное назначение – метрология волоконнооптических систем передачи информации (ВОСПИ). Наиболее широкополосные имеют величину $\Delta\lambda > 100$ нм, а мощность из ОВС у наиболее мощных СЛД превышает 100 мВт. Для этого диапазона были созданы широкополосные и мощные СЛД на базе МКРС см. например [78,79]. Также был представлен СЛД диапазона 1550 нм с мощностью до 90 мВт и шириной спектра 65 нм. СЛД диапазона 1300 – 1550 нм обладающие очень широкими спектрами на базе МКРС или квантовых точек были продемонстрированы в работах [80,81]. Их ширина составляла 60 – 70 нм, при мощности из ОВС 10-20 мВт.

Как было отмечено выше, при соответствующей конструкции модуля пространственно одномодовые СЛД могут быть использованы в качестве полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) бегущей волны, которые широко используются в ВОСПИ различного назначения и в других вышеуказанных областях. К главным достоинствам таких ПОУ относятся:

- «Чистое» однопроходное усиление (из ОВС в ОВС) до 30 дБ;
- Спектральная полоса оптического усиления до сотен нанометров;
- Высокая выходная мощность (до 50 мВт из OBC);
- Высокое быстродействие (порядка десятков фемтосекунд в линейном режиме);
- Малые габариты;

Высокие эффективность и надёжность (МТТГ до 10⁶ часов);

Наряду с обычными СЛД и светоизлучающими модулями с волоконным выходом на их основе в оптоэлектронике широкое распространение получили комбинированные источники света, в которых оптические выходы 2-х или более широкополосных СЛД-модулей со смещенными спектрами объединяются с помощью широкополосных оптоволоконных разветвителей [46,82]. Примером могут служить приборы серии BroadLighter отечественного производства. Их главные достоинства – высокая яркость, очень широкий спектр и как следствие – экстремально низкая когерентность. Для примера на Рис. В.6 представлен спектр наиболее широкополосного из двухканальных комбинированных источников – ВгоаdLighter D-890. Этот источник света широко используется при проведении исследований в области ОКТ по всему миру.



Рис. В.6 Спектр излучения комбинированного источника BroadLighter-D-890

Современные многоканальные комбинированные источники можно также разбить по диапазонам длин волн:

Трёхканальный источник: 5-10 мВт мощности из ОВС и 200 нм при медианной длине волны 870 нм

Четырёхканальный источник: 5 мВт мощности из ОВС и 300 нм при медианной длине волны 940 нм

Четырёхканальный источник: 5 мВт мощности из ОВС и 200 нм при медианной длине волны 1370 нм

Четырёхканальный источник: 5 мВт мощности из ОВС и 250 нм при медианной длине волны 1430 нм

К сожалению, спектры излучения подобных источников имеют сложную изрезанную форму с неоднородностью спектра 20-30%, что приводит к высоте «пьедестала» АКФ около 20-25%.

На основе ПОУ создано множество типов перестраиваемых лазеров. Например, при использовании «просветлённого» ЛД на основе КРС и дифракционной объемном решетки В внешнем резонаторе В качестве спектрально-селективного элемента [83] была реализована непрерывная перестройка в спектральной полосе 760-840 нм.

Перспективным решением является использование акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ) в качестве спектрально-селективного элемента инжекционных полупроводниковых лазеров с внешним резонатором [84]. Так как при таком решении отсутствуют механические подвижные части, а спектральное положение полосы пропускания АОПФ определяется частотой управляющего электрического ВЧ-сигнала, обеспечиваются высокая точность и спектральной Кроме воспроизводимость перестройки. того, указанная перестройка может производиться достаточно быстро (более 10⁶ нм/сек [85,86]). Подобные перестраиваемые лазеры были реализованы в различных диапазонах длин волн.

В частности, в работе [87] был исследован лазер на основе двухпроходного ПОУ с центральной длиной волны полосы усиления 1060 нм и АОПФ во внешнем линейном оптоволоконном резонаторе. На основе этих исследований был разработан серийный прибор BroadSweeper 1060, обладающий полосами перестройки 65 нм и 60 нм при выходной мощности 1мВт и 5мВт соответственно. Его скорость свипирования достигала 10⁴ нм/с, а мгновенная ширина спектральной линии не превышала 0,06нм.

Описание работы.

Несмотря на широкий спектр источников излучения на основе СЛД и ПОУ, представленных на рынке оптоэлектроники на сегодняшний день, динамично развивающиеся научно-прикладные области (спектроскопия, оптическая метрология, оптическая когерентная томография и ряд других) постоянно повышают требования к широкополосным источникам излучения и усилителям. Поэтому цель данной работы заключалась в разработке источников излучения на приборов основе суперлюминесцентных с выходными параметрами, превосходящими аналогичные приборы, коммерчески доступные на сегодняшний день.

В рамках диссертационной работы велись исследования по следующим направлениям:

• Создание суперлюминесцентных диодов различных диапазонов длин волн с рекордными спектральными и мощностными параметрами.

 Создание новых комбинированных источников света на основе разработанных суперлюминесцентных диодов.

 Создание нового высокоэффективного широкополосного полупроводникового оптического усилителя с центральной длиной волны 1060 нм.

 Создание нового быстроперестраиваемого лазера на основе разработанного ПОУ.

Техническая новизна работы:

 Разработаны и исследованы высоконадёжные СЛД с центральной длиной волны в диапазоне 660-690 нм, превосходящие по выходной мощности существующие аналоги. Разработаны и исследованы СЛД на основе ОКРС диапазона 800 - 900 нм с колоколообразной формой спектра. В этих приборах толщина активных слоёв, длины активных каналов и рабочие режимы были выбраны таким образом, чтобы вклад в суперлюминесценцию давали квантовые переходы только из основной подзоны энергетического спектра. При этом с ростом тока инжекции ширина спектра сильно увеличивается в отличие от СЛД на основе «объёмных» двухсторонних гетероструктур (ДГС), в которых ширина спектра слабо зависит от уровня накачки. Использование различных составов активных слоёв позволило разработать серию СЛД-модулей с различными центральными длинами волн в указанном спектральном диапазоне и выходными мощностями от единиц до десятков мВт. По ширине спектра эти приборы превосходят существующие аналоги. Форма спектра излучения, близкая к гауссовой, позволяет получить АКФ с минимальными искажениями центрального пика, что, в свою очередь, улучшает соотношение сигнал-шум при применении этих СЛД в интерференционных системах.

 Разработаны и исследованы СЛД, обладающие рекордно широким спектром порядка 100 нм при центральной длине волны около 830 нм, на основе ОКРС со сверхтонким активным слоем.

На основе разработанных СЛД созданы два типа двухканальных комбинированных источников излучения «ближайшего» ИК - диапазона с шириной спектра около 100 нм и 200 нм. Приборы первого типа, в отличие от существующих аналогов, обладают колоколообразной формой спектра и АКФ, практически не содержащей «пьедестала», что является неоспоримым преимуществом для ряда практических применений, в частности для ОКТ. Прибор второго типа обладает рекордной для приборов данного класса длиной когерентности излучения и крайне низкой чувствительностью к оптической паразитной обратной связи.

Разработаны и исследованы 4 типа пространственно-одномодовых
 СЛД с различными центральными длинами волн (790 нм, 840 нм, 960 нм и

1060 нм), обладающих непрерывной выходной оптической мощностью до 100 мВт. Разработаны миниатюрные высоконадёжные светоизлучающие модули на их основе, превосходящие по выходной мощности существующие аналоги в 1,5-2 раза.

 Разработана новая модель ПОУ-модуля бегущей волны на основе (InGaAs) двухслойной квантоворазмерной структуры (ДКРС) с полосой оптического усиления шириной порядка 100 нм, с центральной длиной волны 1060 нм. По основным техническим характеристикам этот ПОУ превосходит существующие аналоги.

 Использование разработанного ПОУ в кольцевом оптоволоконном резонаторе позволило усовершенствовать ранее выпускавшуюся модель перестраиваемого лазера, в котором были применены менее эффективный ПОУ и линейная схема внешнего резонатора.

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, приложения и списка литературы.

На защиту выносятся следующие положения:

• На основе КРС с тремя активными слоями (Ga_{0.4}In_{0.6}P) толщиной 6 нм, и с градиентным волноводом возможна реализация СЛД и светоизлучающих модулей на их основе с центральной длиной волны в диапазоне 660-690 нм. Выходная мощность излучения в открытое пространство может достигать 20 мВт в условиях непрерывной инжекции. Медианное время жизни составляет 20000 ч.

• На основе квантоворазмерных структур с напряжёнными активным слоями различного состава (Al_{0.02}Ga_{0.98}As, In_{0.05}Ga_{0.95}As, In_{0.09}Ga_{0.91}As, In_{0.13}Ga_{0.87}As) и толщины (4,5-8,5 нм) с симметричным ступенчатым волноводом реализуемы СЛД и светоизлучающие модули на их основе с центральной длиной волны в диапазоне 800-900 нм, обладающих колоколообразной формой спектра различной ширины (27-63 нм), зависящей от длины активного канала и тока инжекции.

Выходная мощность излучения, выводимая через одномодовый волоконный световод (OBC) может достигать 32 мВт в условиях непрерывной инжекции. Среднее время жизни составляет 35000 ч.

• На основе однослойной (In_{0.04}Ga_{0.96}As) КРС с активным слоем толщиной 6 нм и с симметричным ступенчатым волноводом возможна реализация СЛД и светоизлучающих модулей на их основе с шириной спектра 92-102 нм, зависящей от длины активного канала, с центральной длиной волны 830 нм. Выходная мощность излучения, выводимая через ОВС может достигать 2,2 мВт в условиях непрерывной инжекции.

• На основе различных квантоворазмерных структур можно создать пространственно-одномодовые СЛД и светоизлучающие модули на их основе в корпусах ТОW и TO-9 с центральными длинами волн 790 нм, 840 нм, 960 нм и 1060 нм и непрерывной выходной оптической мощностью до 100 мВт. Однослойной (GaAs) КРС с толщиной активного слоя 3,5 нм и градиентным волноводом соответствует центральная длина волны 790 нм, время жизни 2000 ч. Однослойной (GaAs) КРС с толщиной активного слоя 9 нм и ступенчатым волноводом соответствует центральная длина волны 840 нм, время жизни 15000 ч. Однослойной (In_{0.2}Ga_{0.8}As) КРС с толщиной активного слоя 6 нм и градиентным волноводом соответствует центральная длина волны 840 нм, время жизни 15000 ч. Двухслойной (In_{0.35}Ga_{0.65}As) КРС с толщиной активных слоёв 7 нм и ступенчатым волноводом соответствует центральная длина волны 960 нм, время жизни 11000 ч. Двухслойной (In_{0.35}Ga_{0.65}As) КРС с толщиной активных слоёв 7 нм и ступенчатым волноводом соответствует центральная длина волны 960 нм, время жизни 11000 ч. Двухслойной (In_{0.35}Ga_{0.65}As) КРС с толщиной активных слоёв 7 нм и ступенчатым волноводом соответствует центральная длина волны 960 нм, время жизни 11000 ч. Двухслойной (In_{0.35}Ga_{0.65}As) КРС с толщиной активных слоёв 7 нм и ступенчатым волноводом соответствует центральная длина волны 1060 нм, время жизни 40000 ч.

• С помощью серийных широкополосных волоконных оптических разветвителей с различными коэффициентами деления, зависящими от длины волны, возможно объединение излучения двух СЛД с квазигауссовой формой спектра с частично перекрывающимися спектрами излучения. При этом результирующий спектр будет иметь колоколообразную форму с центральной длиной волны спектра излучения 830-860 нм, шириной 65-100 нм при

непрерывной выходной оптической мощности 5-20 мВт из ОВС. Выходные параметры зависят от конкретной комбинации СЛД.

• На основе объединения излучения двух СЛД, один из которых изготовлен из однослойной ($In_{0.04}Ga_{0.96}As$) КРС с активным слоем толщиной 6 нм, а другой на основе однослойной ($In_{0.2}Ga_{0.8}As$) КРС с активным слоем толщиной также 6 нм реализуем комбинированный источник света с шириной спектра излучения (по уровню 0,5) достигающей 200 нм при центральной длине волны 876-884 нм и мощности излучения на выходе волоконного разветвителя 1,5 мВт.

• На основе КРС с двумя активными слоями состава In_{0.35}Ga_{0.65}As, толщиной 7 нм, и с симметричным ступенчатым волноводом возможна реализация полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) и светоизлучающих модулей на их основе диапазона 1010-1110 нм, с полосой оптического усиления шириной от 75 нм (по уровню -3 дБ от максимального) до 100 нм (по уровню 10 дБ) и с максимальным коэффициентом усиления малого входного сигнала (из ОВС в ОВС) 25 дБ. Выходная мощность излучения, выводимая через ОВС может достигать 20 мВт в условиях непрерывной инжекции. Среднее время жизни в двухпроходном режиме составляет 10000 ч.

• На основе разработанного усилителя в качестве активного элемента и с управляемым акустооптическим фильтром в качестве спектрально-селективного элемента в кольцевой схеме внешнего оптоволоконного резонатора возможно усовершенствование ранее выпускаемой модели перестраиваемого лазера, в котором были использованы менее эффективный ПОУ и линейная схема внешнего резонатора. Диапазон спектральной перестройки и выходная оптическая мощность увеличены в 1,5 (до 100 нм) и в 4 (до 20 мВт) раза соответственно. В новом лазере осуществима ручная перестройка с точностью 0.05 нм или свипирование длины волны по линейному закону в диапазоне 1010-1110 нм со скорость до 10⁴ нм/сек при выходной оптической мощности до 20 мВт. Мгновенная ширина линии не превышает 0.1 нм. Методы исследования:

При проведении экспериментальных исследований использовались универсальный стенд, оснащённый современным аттестованным оборудованием (ILX OMM-6810B, ANDO AQ6317B, ADVANTEST Q8347, Goniometric radiometer LD/8900/IR), позволяющим измерять все основные электрические, оптические и пространственные характеристики образцов СЛД в условиях термостабилизации в широком диапазоне температур; специализированный стенд для измерения спектров оптического усиления и передаточных характеристик ПОУ с использованием перестраиваемого лазера в качестве генератора входного сигнала (BroadSweeper-1060); автоматизированная система для проведения ресурсных испытаний с круглосуточным режимом работы

Личный вклад автора:

Выработка технического задания (ТЗ) на выращивание новых типов квантоворазмерных полупроводниковых гетероэпитаксиальнх структур. Выбор конструкции СЛД и выработка ТЗ оптимальной на их изготовление. Исследование физических характеристик экспериментальных образцов СЛД, включая ресурсные испытания. Доработка СЛД по результатам исследований и внесение корректив в их конструкцию. Обработка и систематизация результатов испытаний. Сборка, настройка ресурсных И испытания новых типов комбинированных источников света на основе СЛД. Написание и оформление спецификаций на разработанные приборы, тезисов докладов и статей. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород (2012); 9th Belarusian-Russian Workshop "Semiconductor Lasers and Systems", Minsk (2013); 6th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers - CAOL'2013, Sudak (2013); 1st Symp. on OCT for Non-Destruct. Testing, Linz,

Austria (2013); International Nano-Optoelectronic Workshop iNOW2013, Corsica, France (2013); 16th International Conference "Laser Optics 2014", St. Petersburg, (2014); 17th International Conference on MVPE, Lausanne, Switzerland (2014).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

[1] Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, П.И.Лапин, Д.С.Мамедов, С.Д.Якубович, "Изменение выходных характеристик широкополосных СЛД в ходе продолжительной работы," Квантовая электроника, **41**, 7, стр. 595-601 (2011).

[2] С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, И.А.Кукушкин, М.А.Ладугин, П.И.Лапин, А.А.Лобинцов, А.А.Мармалюк, С.Д.Якубович, "Широкополосные СЛД и ПОУ спектрального диапазона 750-800 нм," Квантовая электроника, **41**, 8, стр. 677-680 (2011).

[3] С.Н.Ильченко, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, С.Д.Якубович, "СЛД «ближайшего» ИК-диапазона с шириной спектра 100 нм," Квантовая электроника, **42**, 11, стр. 961-963 (2012).

[4] Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, М.А.Ладугин, П.И.Лапин, А.А.Мармалюк, С.Д.Якубович, "Широкополосные СЛД диапазона 800-900 нм с колоколообразной формой спектра," Квантовая электроника, **43**, 8, стр. 751-756 (2013).

[5] Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, М.А.Ладугин, А.А.Лобинцов, А.А.Мармалюк, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович, "Широкополосные ПОУ спектрального диапазона 750-1100 нм," Квантовая электроника, **43**, 11, стр. 994-998 (2013).

[6] Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, С.Д.Якубович, "Поперечноодномодовые суперлюминесцентные диоды ближнего ИК диапазона спектра с непрерывной выходной мощностью до 100 мВт," Квантовая электроника, **44**, 10, стр. 903-906 (2014).

Другие статьи и материалы конференций:

[7] С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, М.А.Ладугин, П.И.Лапин, А.А.Лобинцов, А.А.Мармалюк, С.Д.Якубович, "Широкополосные СЛД и ПОУ с центральной длиной волны 780 нм," 8th Belarusian-Russian Workshop "Semiconductor Lasers and Systems", Minsk, Book of Papers, p. 91-95 (2011).

[8] S.N.Ilchenko, Yu.O.Kostin, M.A.Ladugin, P.I.Lapin, A.A.Lobintsov, A.A.Marmalyuk, S.D.Yakubovich, "Broad-band SLDs emitting at 750-800 nm," 11th Int. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkov, Ukraine Conf. Proc., paper LFNM-003 (2011).

[9] E.V.Andreeva, S.N.Ilchenko, Yu.O.Kostin, P.I.Lapin, D.S.Mamedov, S.D.Yakubovich, "Changes in output characteristics of broad-band SLDs in the process of long-term operation," 11th Int. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkov, Ukraine Conf. Proc., paper LFNM-004 (2011).

[10] S.N.Ilchenko, A.A.Lobintsov, V.R.Shidlovskii, M.V.Shramenko, S.D.Yakubovich, "High-power sweeping semiconductor light sources at 840 nm with up to 100nm tuning range," Proc. of SPIE, 8213, p. 82133A (2012).

[11] Ю.Л.Рябоштан, П.В.Горлачук А.А.Мармалюк, А.А.Лобинцов, С.Д.Якубович, "Мощные С.Н.Ильченко, СЛД (670 нм) на основе InGaP/AlGaInP/GaAs," квантоворазмерных гетероструктур Труды Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2, стр. 372-373 (2012).

[12] E.V.Andreeva, A.Yu.Chamorovsky, S.N.Ilchenko, Yu.O.Kostin, P.I.Lapin, S.D.Yakubovich, "SLD-based broad-band light sources with bell-shaped spectra in the range of 800-900 nm," Abstract Collection, 1st Symp. on OCT for Non-Destruct. Testing, Linz, Austria, p. 93-95 (2013).

[13] Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, М.А.Ладугин, П.И.Лапин, А.А.Мармалюк, С.Д.Якубович, "Широкополосные суперлюминесцентные диоды на основе наногетероструктур с ультратонкими активными слоями," 9th Belarusian-Russian Workshop "Semiconductor Lasers and Systems", Minsk, Book of Papers, p. 88-91 (2013).

[14] С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, С.Д.Якубович, "Высокоэффективные суперлюминесцентные диоды с центральными длинами волн 1310 и 1550 нм," 9th Belarusian-Russian Workshop "Semiconductor Lasers and Systems", Minsk, Book of Papers, p. 92-94 (2013).

[15] E.V.Andreeva, A.Yu.Chamorovsky, S.N.Ilchenko, Yu.O.Kostin, P.I.Lapin, S.D.Yakubovich, "Broadband SLD sources with bell-shaped spectra for the 800-900 nm spectral range," Proc. of Int. Nano-Optoelectronic Workshop iNOW2013, Corsica, France, p. B17-B18 (2013).

[16] E.V.Andreeva, S.N.Ilchenko, Yu.O.Kostin, M.A.Ladugin, P.I.Lapin, A.A.Marmalyuk, S.D.Yakubovich, "Broadband SLDs of NIR range with quasi-Gaussian spectra", Proc. of 6th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL'2013, p. 114-116 (2013).

[17] E.V.Andreeva, S.N.Ilchenko, M.A.Ladugin, A.A.Lobintsov, A.A.Marmalyuk, M.V.Shramenko, S.D.Yakubovich, "Broadband SOAs of NIR range based on nanoheterostructures," Proc. of 6th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL'2013, p. 123-125 (2013).

[18] S.N.Ilchenko, Yu.O.Kostin, S.D.Yakubovich, "Spatially single-mode reliable superluminescent diodes with CW output power of up to 100 mW," 16th Int. Conf. "Laser Optics 2014", Paper ThR3-29 (2014).

[19] S.N.Ilchenko, Yu.O.Kostin, S.D.Yakubovich, "SLD-based light-emitting modules at 1300 nm operable in temperature range from –55 °C to +125 °C," 16th Int. Conf. "Laser Optics 2014", Paper ThR3-30 (2014).

[20] A. Padalitsa, A. Marmalyuk, I. Yarotskaya, P. Gorlachuk, Y. Ryaboshtan, S. Il'chenko, A. Lobintsov, S. Yakubovich, "Heterostructures AlGaInP/GaInP grown by MOVPE for superluminescent diodes emitting at 670 nm," 17th International Conference on MVPE, Lausanne, Web-Poster-0-71 (2014).
Глава 1. Новые СЛД повышенной мощности и широкополосности

Введение

Благодаря отсутствию характерной пятнистой структуры (спеклов) в распределении интенсивности света, отражённого от шероховатой поверхности в отличии от когерентного света лазера, СЛД диапазона 660-680 нм спектра крайне востребованы в системах некогерентной подсветки, машинного зрения, оптических датчиках, и др. Раздел 1.1 посвящён изучению СЛД именно этого спектрального диапазона.

Как уже отмечалось выше, СЛД часто применяются в качестве источников излучения для оптической когерентной томографии. Наиболее востребованными лля ОКТ сетчатки человеческого глаза являются приборы обладающие непрерывной выходной мощностью от 2 до 50 мВт, спектром с центром около 840 нм и шириной 45-50 нм. Как правило, такие приборы строятся на основе ОКРС в системе (GaAl)As/GaAs [88]. Усовершенствование таких гетероструктур позволяет несколько повысить ширину спектра и/или выходную оптическую мощность. Максимум спектральной ширины (минимум когерентности) излучения обычно достигается в СЛД обладающих характерной двугорбой формой спектра, что соответствует рабочим условиям, при которых интенсивности квантовых переходов из основного и первого возбужденного состояний выравниваются. Глубина провала между спектральными максимумами является весьма критичным параметром. Для практических применений в ОКТ обычно требуется, чтобы эта величина не превышала 2,0 дБ (37%), а в идеале отсутствовала полностью, при сохранении нужной полуширины спектра. В разделе 1.2 данной главы приводятся результаты экспериментальных исследований квантоворазмерных суперлюминесцентных диодов с экстремально тонкими активными слоями состава (AlGa)As и (InGa)As и центральными длинами волн около 810 нм, 840 нм, 860 нм и 880 нм. Их спектр излучения имеет форму, близкую к гауссовой, а его полуширина составляет 30-60 нм в зависимости от длины активного канала и уровня накачки. Подобная форма спектра обеспечивает

отсутствие пьедестала на автокорреляционной функции, что обеспечивает наибольшее соотношение сигнал-шум. В непрерывном режиме инжекции мощность светоизлучающих модулей на основе этих СЛД может составлять 1.0-25 мВт на выходе ОВС.

Если же требуется максимальное пространственное разрешение получаемых томограмм, невзирая на шумы, то ширина спектра остаётся наиболее важным параметром. Для СЛД с центральными длинами волн более 900 нм спектральная полоса шириной порядка 100 нм не является чем-то новым. Что же касается СЛД «ближайшего» ИК диапазона, то в настоящее время, коммерчески доступные образцы обладают шириной спектра не превышающей 70 нм. В разделе 1.3 представлены экспериментальные результаты по созданию и исследованию СЛД с центральной длиной волны в районе 830 нм, обладающих шириной спектра излучения порядка 100 нм.

Помимо ОКТ суперлюминесцентные диоды имеют множество других применений, для которых в первую очередь важна большая выходная мощность излучения, а не ширина спектра. В разделе 1.4 описана серия новых светоизлучающих модулей на основе одномодовых квантоворазмерных СЛД с центральными длинами волн излучения около 790 нм, 840 нм, 960 нм и 1060 нм, обладающих непрерывной выходной мощностью в открытое пространство до 100 мВт.

1.1 СЛД повышенной мощности и надёжности с центральной длиной волны излучения 670 нм.

Лазерные диоды (ЛД) красного диапазона спектра (630-690 нм) нашли широчайшее применение в науке, в технике и в быту. Их главное применение – запись и считывание информации в системах оптической памяти (DVD и др.) Кроме того, они используются в медицинской диагностике и терапии, в лазерных принтерах, в различном измерительном оборудовании, в считывателях штрих-кодов, в лазерных указках и так далее. Десятки фирм выпускают множество таких моделей ЛД, отличающихся по конструкции, выходной мощности и по спектральным параметрам. Обычно, они изготавливаются на основе многослойных квантоворазмерных гетероструктур (МКРС) в системах (AlGaIn)PAs. По внешней квантовой эффективности и надёжности лучшие образцы приближаются к рекордным результатам, достигнутым для ЛД ИК-диапазона спектра. На оптоэлектронном рынке за год реализуется несколько миллионов «красных» ЛД.

Рынок «красных» СЛД на несколько порядков меньше. По нашим фирмы ООО «Суперлюминесцентные сведениям только лве диоды» (SUPERLUM Ltd.) и EXALOS серийно выпускают несколько моделей СЛД-модулей с центральной длиной волны в диапазоне 650-680 нм. Тем не менее, они устойчиво занимают свою нишу в оптоэлектронике (системы некогерентной подсветки, машинной зрение, некоторые оптических типы датчиков, низкокогерентные интерференционные системы И др.) Например, фирма AGILENT за последние годы приобрела несколько тысяч модулей серии SLD-26 для использования в производимых ею атомно-силовых микроскопах. Эти СЛД изготавливаются на основе упомянутых выше МКРС. Они имеют спектр излучения колоколообразной формы с полушириной 5-10 нм. Что касается выходной оптической мощности, то по этому параметру рассматриваемые СЛД уступают лучшим образцам «красных» ЛД (см. например [89]) более, чем на порядок: 10-15 мВт и сотни мВт соответственно. Сравнение относится к пространственно-одномодовым приборам с шириной активного канала в единицы микрометров. Причиной ЭТОГО является присущая СЛД пониженная дифференциальная квантовая эффективность и, главное, аномально низкий порог катастрофической деградации (КОД). По оптической ЭТОМУ параметру рассматриваемые СЛД значительно уступают И СЛД «ближайшего» ИК-диапазона спектра – менее 30 мВт и более 100 мВт соответственно. Причём, если у последних КОД, как правило связана с разрушением торцевых граней кристалла, как у ЛД, то у «красных» СЛД она определяется, по видимому, массовым появлением центров безызлучательной рекомбинации в активном канале. Это закономерность подтверждается обширной статистикой, относящейся к приборам на основе различных МКРС как отечественного, так и зарубежного производства, успешно используемых для изготовления «красных» ЛД. Что касается срока службы рассматриваемых СЛД, определяемого процессами «медленного» старения, то до последнего времени он также желал оставлять лучшего. Время жизни в несколько тысяч часов, при непрерывном режиме работы, считалось приемлемым. Напомним также, что типичная выходная мощность серийных «красных» СЛД-модулей с выводом излучения через ОВС не превышает 5 мВт. (модель SLD-261-HP, SIPERLUM).

В рамках настоящей работы были исследованы входные и ресурсные характеристики СЛД с центральной длиной волны около 670 нм, на основе оптимизированной МКРС [90], позволившей заметно повысить достижимую выходную мощность и значительно повысить срок службы этих приборов. Зонная диаграмма МКРС, выращенной методом газотранспортной эпитаксии низкого давления из металлорганических соединений схематично представлены на Рис. 1.1.1.



Рис. 1.1.1 Зонная диаграмма использованной трёхслойной КРС в системе (AlGaIn)P/GaAs

Конструкция СЛД была традиционной. Активный канал представлял собой гребневидный волновод толщиной около 0,14 мкм и шириной W=4 мкм, его ось

имела наклон 7° по отношению к торцевым граням кристалла (Рис. 1.1.2), на которые были нанесены антиотражающие покрытия (АОП) (Рис. 1.1.3). Величина L_a варьировалась в пределах 700-1600 мкм. Измерения производились в непрерывном режиме инжекции при температуре 25° C.



a.



Рис. 1.1.2 Микрофотография торцевой грани СЛД (а) и общий вид гребневидного волновода (б)



Рис. 1.1.3 Активные элементы СЛД с прямым волноводным активным каналом, ориентированным под наклоном к торцевым граням. (W – ширина активного канала; L_a – длина активного канала, α-угол наклона волновода)

Типичные вольт-амперные и ватт-амперные характеристики представлены на Рис. 1.1.4, а спектр излучения и центральный пик АКФ на Рис. 1.1.5.



Рис. 1.1.4 Типичные Ватт-Амперные (а) и Вольт-Амперные (б) характеристики исследованных СЛД.



Рис. 1.1.5 Спектр излучения (а) и центральный пик АКФ (б) при выходной оптической мощности 20 мВт.

Как по величине дифференциальной квантовой эффективности (0.2-0.3 Вт/А) так и по величине порога КОД (25-30 мВт) исследованные образцы оказались близки к лучшим из исследованных ранее СЛД на основе подобных наногетероструктур. Выходное излучение было сильно поляризованным в плоскости p-n перехода (степень поляризации – более 99%). Сечение выходного

пучка имело характерную для СЛД серповидную форму. Расходимость составляла приблизительно 10х40 градусов. Забегая вперёд, укажем, что их огромным достоинством является повышенная надёжность.

Обычно рабочие токи СЛД выбираются при уровнях выходной мощности, не превышающих 50% порога КОД. В данном случае предварительные ресурсные испытания были проведены при непрерывных выходных мощностях до 20 мВт. Хронограммы на Рис. 1.1.6 иллюстрируют результаты этих испытаний, которым подверглись три партии образцов, в каждую из которых входило по пять рассматриваемых СЛД, успешно прошедших предварительную наработку в течение 120 часов. Испытания продолжались 1500 часов при температуре 25°C при уровнях выходной оптической мощности 5 мВт, 10 мВт и 20 мВт. У первой группы образцов наблюдался медленный рост выходной мощности в течение всего периода испытаний.



Рис. 1.1.6 Хронограммы ресурсных испытаний при выходной мощности 5 мВт (а), 10 мВт (б) и 20 мВт (в).

У образцов второй группы после небольшого спада в течение первых 500 часов испытаний, мощность оставалась практически неизменной. Учитывая точность измерений, срок службы СЛД в этом режиме работы можно оценить величиной более 100000 часов. Среди образцов третьей группы, несмотря на близость к порогу КОД, два вели себя также как и вторая группа, а у трёх наблюдался медленный спад выходной мощности. Минимальный срок службы можно оценить величиной 20000 часов, что приемлемо для большинства практических применений. Используя пространственно одномодовые СЛД с выходной мощностью 20 мВт в открытое пространство можно с уверенностью изготавливать светоизлучающие модули с выходной мощностью более 10 мВт через OBC. Такие модули были изготовлены с использованием корпусов Butterfly и одномодового оптоволокна FiberCore SM600 (предварительное наименование модели SLD-261-HP2). Они успешно прошли предварительные ресурсные испытания. Проект соответствующей спецификации находится в приложении к диссертации.

1.2 Широкополосные СЛД диапазона 800–900 нм с колоколообразной формой спектра Введение

В системах оптической когерентной томографии [91], использующих (Time-domain, Fourier-domain низкокогерентные источники света OCT). важнейшей характеристикой указанных источников является автокорреляционная функция (АКФ) или функция когерентности, представляющая собой Фурье-образ спектра излучения и измеряемая, например, как зависимость видности интерференционной картины от оптической разности хода в симметричном интерферометре Майкельсона. Ширина главного центрального максимума АКФ соответствует длине когерентности излучения L_C. Эта величина, обратно пропорциональная ширине оптического спектра ($L_C \sim \lambda_c^2 / \Delta \lambda$, где λ_c – центральная длина волны), определяет аксиальное разрешение получаемых томограмм. Наличие дополнительных максимумов, примыкающих к главному или отстоящих от него, уменьшает отношение сигнал/шум и ухудшает качество получаемых изображений. АКФ «идеального» для ОКТ излучения должна содержать единственный узкий максимум, соответствующий нулевой разности хода. Такой АКФ обладает излучение с широким гладким спектром гауссовой формы:

$$S(\lambda) = S_0 \exp[-\gamma(\lambda - \lambda_c)^2]. \qquad (1.2.1)$$

Как уже упоминалось ранее, наиболее широкое применение в качестве источников света для указанных систем ОКТ нашли полупроводниковые суперлюминесцентные диоды (СЛД). Традиционные СЛД с «объемным» активным слоем имеют форму спектра очень близкую к гауссовой. Именно такие СЛД с центральной длиной волны в диапазоне 820-840 нм были использованы в первой серийной ОКТ-системе медицинского назначения "Stratos" производства Carl Zeiss Meditec. Эти СЛД на основе двусторонней гетероструктуры (GaAl)As с раздельным ограничением (РО ДГС) с поперечно-одномодовым активным каналом шириной в единицы мкм при выходной оптической мощности в десятки мВт обладают шириной спектра излучения 15-20 нм.

Позднее были созданы квантоворазмерные СЛД данного спектрального диапазона с толщиной активного слоя порядка 10 нм [82,92]. Благодаря вкладу в суперлюминесценцию квантовых переходов не только из основной, но и из возбужденной подзоны, ширина их спектра может достигать 100 нм. Такие СЛД нашли самое широкое применение в ОКТ-системах, поскольку их использование позволило значительно повысить пространственное разрешение. Недостатком этих СЛД является двугорбая форма спектра, далекая от гауссовой, и наличие «пьедестала» у центрального максимума АКФ, что не может не отразиться на качестве получаемых изображений. Типичные спектры и АКФ «объемных» и квантоворазмерных СЛД представлены на Рис. 1.2.1



Рис. 1.2.1 Типичные спектры (а) и центральные пики АКФ (б) «объемных» (сплошные кривые) и «двугорбых» квантоворазмерных (пунктир) СЛД.

Следует отметить, что остаточная модуляция спектров СЛД модами Фабри-Перо (ripple) приводит к появлению на АКФ вторичных максимумов при разности хода 2nL_a, где n - эффективный показатель преломления, L_a – длина активного канала. Для СЛД данного спектрального диапазона при использовании

достаточно совершенных антиотражающих покрытий на торцевых гранях кристаллов глубина периодической спектральной модуляции не превышает десятых долей процента, а относительная величина вторичных максимумов не превышает -25 дБ. Ниже мы больше не будем касаться этого вопроса.

В квантоворазмерных СЛД со сверхтонкими активными слоями в единицы нм возбужденная подзона смещается в область высоких энергий. При этом при разумных плотностях постоянного тока инжекции, по крайней мере в СЛД с достаточно большой длиной активного канала L_a, возбужденная подзона не заполняется и спектр суперлюминесценции определяется квантовыми переходами только из основной подзоны. Форма спектра таких СЛД также близка к гауссовой, а его ширина сильно зависит от величины L_a и уровня накачки и может превышать 60 нм. Настоящая работа посвящена исследованию источников света на основе СЛД указанного типа.

Экспериментальные образцы

Экспериментальные образцы СЛД были изготовлены ИЗ полупроводниковых двусторонних гетероструктур с раздельным ограничением фотонного поля и носителей заряда (РО ДГС) и со стандартными для системы (AlGa)As геометрией и составами контактных, эмиттерных и волноводных слоев. Их особенностью являлась конструкция квантоворазмерной активной области, обеспечивающая возможность получить центральную длину волны усиленного спонтанного излучения в различных точках спектрального диапазона 800-900 нм и при этом сильно «раздвинуть» спектральные максимумы, соответствующие квантовым переходам из основного и возбужденного состояний. Решение данной задачи невозможно при использовании традиционных для гетероструктур данного спектрального диапазона квантовых ям из GaAs. Проведенные расчеты показали, что практическая реализация указанных параметров требует использования напряженных сверхтонких квантовых ям из твердых растворов (AlGa)As или (InGa)As с небольшим содержанием Al или In (На Рис.1.2.2 продемонстрирована зонная диаграмма подобной РО ДГС). Такой подход позволяет увеличить высоту потенциального барьера квантовой ямы, что в совокупности с ее малой шириной дает возможность увеличить расстояние между уровнями размерного квантования до нужных значений. В расчетах использовалась модель прямоугольной квантовой ямы.



Рис 1.2.2 Зонная диаграмма исследованных РО ДГС.

Гетероструктуры выращивалась методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении на подложках GaAs (100) в горизонтальном реакторе проточного типа. В качестве исходных материалов элементов III-группы триметилалюминий, триэтилгаллий использовались И триметилиндий, материалом V-группы выступал 100% арсин, газ носитель – водород. В качестве лигатуры n- и p-типа использовались смесь силана с водородом и диэтилцинк соответственно. Температура роста изменялась в диапазоне 640÷770 °C, а давление в реакторе в диапазоне – 60÷65 торр. В ходе данной работы были выращены 12 квантоворазмерных гетероструктур, отличающихся составом и толщиной активного слоя d_a, которая варьировалась в пределах 4,5-9,0 нм. Из каждой эпитаксиальной пластины были изготовлены по несколько партий поперечно-одномодовых СЛД, отличавшихся только длиной активного канала L_a.

Экспериментальные исследования физических характеристик этих СЛД позволили получить статистически подтвержденную информацию о зависимости выходных параметров образцов с одинаковыми длинами волн излучения от толщины их активного слоя, а также о выходных параметрах образцов с одинаковыми толщинами активных слоев различного состава

Конструкция СЛД была традиционной. Активный канал представлял собой гребневидный волновод толщиной около 0,25 мкм и шириной W = 4 мкм, его ось имела наклон 7^о по отношению к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены антиотражающие покрытия. Величина L_a варьировалась в пределах 700-1600 мкм. Измерения производились в непрерывном режиме инжекции при температуре 25 ^оC.

Экспериментальные результаты.

На Рис.1.2.3 изображены типичные Вт-А характеристики и зависимости полуширины спектра излучения от тока инжекции «объемного» и одного из квантоворазмерных СЛД, исследованных в данной работе. Образцы имеют абсолютно одинаковые конструкции и составы гетерослоёв за исключением активного слоя, толщина которого составляла 28 нм (GaAs) и 6,5 нм (In_{0.04}Ga_{0.96})Аs соответственно. Их спектры суперлюминесценции разительно отличаются как по ширине, так и по характеру ее зависимости от уровня накачки.

Эти отличия пока не имеют объяснения. В ФИРАН им. П.Н.Лебедева была теоретического физических сделана попытка описания характеристик квантоворазмерного СЛД с использованием трёхзонной модели [93], которая характеристики пространственно-одномодовых хорошо описывает ЛЛ квантоворазмерными слоями состава (InGa)As. Для ватт-амперных характеристик получено хорошее соответствие. Что же касается зависимости ширины спектра от тока инжекции. то теоретическая кривая оказалась очень близкой К экспериментальной для «объёмного» СЛД (слабая зависимость, Δλ<20нм)



Рис. 1.2.3 Типичные Вт-А характеристики (а) и зависимости полуширины спектра от тока инжекции (б) «объемного» (1) и квантоворазмерного (2) СЛД $(d_{Bulk} = 28$ нм, $d_{SQW} = 6.5$ нм, $L_a = 1200$ мкм, W = 4 мкм). На врезке – аппроксимация спектра квантоворазмерного СЛД функцией Гаусса.

Форма спектра обоих образцов близка к гауссовой. На врезке Рис. 1.2.36 изображена аппроксимация спектра квантоворазмерного СЛД формулой (1.2.1) при $\lambda_c = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ и $\gamma = (-4\ln 0.5)/(\lambda_2 - \lambda_1)^2$, что обеспечивает равенство полуширин. Небольшая асимметрия практически не сказывается на «чистоте» центрального пика АКФ.

В предположении о неизменности спектральной плотности спонтанного излучения и модового усиления вдоль оси активного канала СЛД спектр его выходного излучения согласно [94] можно описать соотношением:

$$S(\lambda) \approx S_{SP}(\lambda) \times [exp((g(\lambda) - \alpha)L_a - 1]/(g(\lambda) - \alpha),$$
 (1.2.2)

где α - коэффициент диссипативных потерь. Строго говоря следует отдельно рассматривать соотношения (1.2.2) для ТЕ и ТМ-мод [46], т.к. у них величины $S_{SP}(\lambda)$ и α могут заметно отличаться. Забегая вперед, укажем, что в выходном излучении рассматриваемых СЛД доминировала ТЕ-мода.

Спектр $S_{SP}(\lambda)$ в рабочих режимах, характерных для СЛД, не поддается прямому измерению. Что же касается спектра однопроходного усиления $G(\lambda) = \exp((g(\lambda) - \alpha)L_a)$, то он может быть достаточно точно измерен для образцов полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) с использованием в качестве генератора входного сигнала перестраиваемого лазера соответствующего спектрального диапазона. Результаты таких измерений (ТЕ-мода) для образцов ПОУ, изготовленных из тех же РО ДГС, что и сравнивавшиеся выше образцы СЛД, представлены на Рис. 1.2.4 Приведенные кривые качественно хорошо соответствуют тенденциям, отображенным на Рис. 1.2.36, что указывает на то, что ширина спектра суперлюминесценции определяется, главным образом, формой спектра оптического усиления.



Рис. 1.2.4 Спектры малосигнального усиления ПОУ на основе «объемной» (а) (L_a = 1200 мкм) и квантоворазмерной (б) (L_a = 1600 мкм) РО ДГС.

Типичные выходные характеристики СЛД с активным слоем толщиной 4,5 нм при различных длинах активного канала и одинаковых плотностях тока инжекции представлены в Табл. 1.2.1. Как и следовало ожидать, с увеличением L_a мощность излучения и его степень поляризации возрастают, а ширина спектра уменьшается.

Состав и	La	Ι	J	P _{FS}	P _{SM}	λ_{m}	Δλ	L _C	
толщина									TE/TM
активного	(мкм)	(MA)	(кА/см ⁻)	(мВт)	(мВт)	(нм)	(нм)	(мкм)	
слоя									
	700	160	5.7	3.3	1.5	837	50	14	9.0
In _{0.08} Ga _{0.92} As	900	190	5.3	10.5	5.8	839	42	17	13
$d_a = 4.5$ nm	1100	240	5.5	24.5	15	840	36	20	19
a	1300	280	5.4	47	29	845	31	23	22
	1600	350	5.5	77	45	850	26	28	28

Табл. 1.2.1 Характеристики СЛД с толщиной активного слоя 4,5 нм при плотности тока инжекции около 5,5 кА/см² (L_a – длина активного канала; I – ток инжекции; J - плотность тока инжекции; P_{FS} – выходная мощность в открытое пространство; P_{SM} – выходная мощность через одномодовый волоконный световод (OBC); λ_m – медианная длина волны; $\Delta\lambda$ - спектральная полуширина; L_C – длина когерентности; TE/TM – поляризационное отношение).

Длина волны около 840 нм является наиболее популярной для СЛД-модулей, используемых в ОКТ-системах. Как было отмечено выше, в рамках данной работы была выращена серия однотипных квантоворазмерных РО ДГС с различными толщинами активных слоев, в которых за счет изменения химического состава твердого раствора (концентраций In и Ga) величина λ_m поддерживалась вблизи указанного значения. На Рис. 1.2.5 приведены величины выходной мощности и полуширины спектра для СЛД с различными L_a, изготовленных из этих гетероструктур, при типичной рабочей плотности тока инжекции. Представлены только значения, соответствующие квазигауссовой

форме спектра. «Короткие» СЛД с «толстыми» активными слоями при данной плотности тока обладают двугорбым спектром. Для выходной мощности выбрана логарифмическая шкала с целью наглядного размещения результатов на одном рисунке.



Рис. 1.2.5 Зависимость выходной мощности (сплошные кривые) и полуширины колоколообразного спектра (пунктир) от толщины активного слоя для квантоворазмерных СЛД с медианной длиной волны около 840 нм при различных длинах активного канала $L_a = 700$ мкм (1); 1100 мкм (2); 1600 мкм (3). Плотность тока инжекции – 5,5 кА/см².

Главный полученный результат – это очень слабая зависимость основных параметров СЛД от толщины активного слоя d_a . Это выгодно отличает рассматриваемые приборы от «двугорбых» СЛД с выровненными спектральными максимумами (серии SLD-37, SLD-35 с $d_a \approx 10$ нм), у которых небольшое изменение величины d_a приводит к значительному изменению спектральных характеристик, что затрудняет получение воспроизводимых результатов при

массовом производстве. В дальнейшем при серийном выпуске рассматриваемых приборов предполагается остановиться на величине d_a около 6,0 нм.

Изменение химического состава активного слоя РО ДГС при его постоянной толщине позволяет изменять в широких пределах медианную длину волны λ_m изготавливаемых СЛД. При этом при смещении в коротковолновую сторону ширина спектра $\Delta\lambda$ несколько сужается, а остальные выходные характеристики остаются близкими. На Рис. 1.2.6 представлены типичные спектры 4-х типов квантоворазмерных СЛД, исследованных в данной работе. В Табл. 1.2.2 приведены основные характеристики этих СЛД при величинах $L_a = 700, 900, 1100$ и 1300 мкм.



Рис. 1.2.6 Типичные спектры излучения СЛД с различными составами активного слоя толщиной 6,0 нм.

Состав активного слоя	L _а (мкм)	І (мА)	J (кА/см ²)	Р _{FS} (мВт)	Р _{SM} (мВт)	λ _m (нм)	Δλ (нм)	L _C (мкм)	TE/TM
	700	150	5.4	2.1	0.9	806	43	15	3
Тип I	900	200	5.5	6.5	3.0	806.5	35.5	18	4
Al _{0.02} Ga _{0.98} As	1100	250	5.7	18	10	807.5	33	20	6
	1300	260	5.0	32	19	809	27	24	10
	700	160	5.7	3.2	1.3	835	57	12	5
Тип II	900	180	5.0	8.5	4.1	840	46	15	7
In _{0.05} Ga _{0.95} As	1100	240	5.5	24	13	844	42	17	15
	1300	280	5.4	46	24	847	34	21	25
	700	170	6.1	2.5	1.2	856	58	13	6
Тип III	900	195	5.4	7.9	4.0	856	49	15	10
In _{0.09} Ga _{0.91} As	1100	240	5.5	17	10	860	42	18	22
	1300	280	5.4	38	24	861	36	20.5	32
	700	170	6.1	2.8	1.4	872	63	12	13
Тип IV	900	180	5.0	6.2	3.1	875	50	15	16
In _{0.13} Ga _{0.87} As	1100	200	4.5	18	9.5	876	48	16	28
	1300	240	4.6	34.5	19	879	44	17.5	34

Табл. 1.2.2 Характеристики СЛД с различными составами активного слоя толщиной около 6,0 нм и с различными длинами активных каналов (Обозначения те же, что и в Табл. 1.1.1)

Выбранные рабочие точки позволяют получить значения P_{SM} около 1.0, 3.0, 10 и 20 мВт. Можно отметить, что маломощные «короткие» СЛД обладают рекордной шириной спектра около 60 нм.

Проведенные ресурсные испытания продемонстрировали достаточно высокую надежность разработанных СЛД. Хронограмма одного из таких испытаний представлена на Рис.1.2.7 Спектральные характеристики СЛД измерялись перед началом испытаний и в дальнейшем через каждые 3000 часов непрерывной работы. Важно отметить, что после наработки в 9000 час. (1 год) изменения величин λ_m и $\Delta\lambda$ не превышали 0,3% и 2,0% соответственно. Экстраполяция приведенных кривых дает для медианного времени жизни оценку в 35000 часов.



Рис. 1.2.7 Хронограмма ресурсных испытаний СЛД Типа II $(L_a = 1400 \text{ мкм}, P_{FS} \approx 35 \text{ мBt}).$

Проведенные исследования позволили приступить к серийному выпуску светоизлучающих модулей новой серии SLD-34, включающей в себя 24 модели, отличающихся выходными характеристиками и типами корпусов (см.приложение). На Рис. 1.2.8 проводится сравнение спектральных

характеристик новых приборов с характеристиками двугорбых приборов серии SLD-37.



Рис. 1.2.8 Спектры выходного излучения (а) и центральные пики АКФ (б) серийного модуля SLD-371 (пунктир) и нового модуля SLD-341.

1.3 СЛД ближайшего ИК-диапазона с двугорбой формой спектра шириной до 100нм. Введение

Вскоре после создания лазерных квантоворазмерных полупроводниковых гетероструктур (наногетероструктур) было показано, что ширина полосы их оптического усиления может достигать ~100 нм [95]. В 1996 г. были экспериментально продемонстрированы суперлюминесцентные диоды (СЛД) с центральной длиной волны излучения 820 нм и шириной трехгорбого спектра 98 hm [46]. Однако эта ширина получена при комбинированной характеризует усредненный импульсно-непрерывной инжекции И спектр. Мгновенные значения ширины спектра, определяющие длину когерентности были приблизительно Позднее были излучения. на треть меньше. продемонстрированы СЛД того же диапазона с шириной спектра до 91.5 нм, работавшие в непрерывном режиме [96]. Результаты этой работы не применялись на практике. что, по-видимому, связано с трудностью получения воспроизводимых параметров использованной В активной области ДЛЯ асимметричной четырехслойной наногетероструктуры.

В серийно настоящее время выпускаются широкополосные квантоворазмерные СЛД, работоспособные в различных диапазонах спектра. Они находят применение в различных прикладных областях, среди которых первое место занимает оптическая когерентная томография [91]. В этом случае ширина спектра является ключевым параметром, определяющим пространственное интерференционной разрешение используемой методики. Для СЛД С центральными длинами волн более 900 нм стонанометровый рубеж по ширине полосы давно преодолен [97,98]. Что же касается коротковолнового, граничащего видимым, ИК диапазона, то В настоящее время С ширина спектра соответствующих СЛД не превышает 70 нм. Напомним, что для «популярных» длин волн 1060, 980 и 830 нм полоса в 100 нм соответствует энергетическим интервалам 0,11, 0,13 и 0,18 эВ соответственно.

Следует отметить, что в наиболее распространенных ОКТ системах офтальмологического назначения в качестве источников света чаще всего используются широкополосные СЛД именно ближайшего ИК диапазона, т. к. он соответствует основному «окну прозрачности» глазной жидкости. К настоящему времени выпущено более 10000 отечественных СЛД-модулей серии SLD-37 с типичной шириной спектра 50 нм. Они успешно работают в составе ОКТ-систем по всему миру. Выпуск модулей серии SLD-35 с шириной спектра до 70 нм не стал столь массовым, однако около сотни научных центров, университетов и фирм, ведущих разработки и исследования новых систем ОКТ, приобрели эти модули либо отдельно, либо в составе комбинированных источников света серии BroadLighter. Подобные СЛД-модули выпускаются и успешно реализуются также EXS21) И DenseLight фирмами EXALOS (серия (серия DL-CR8). Востребованность СЛД данного спектрального диапазона с повышенной широкополосностью не вызывает сомнений.

Экспериментальные результаты

образцы СЛД Экспериментальные были изготовлены ИЗ полупроводниковой гетероструктуры С раздельным ограничением электромагнитного поля и носителей заряда и со стандартными для системы (AlGa)As геометрией слоев и составами контактных, эмиттерных и волноводного слоев. Особенностью гетероструктуры является конструкция квантоворазмерной активной области, обеспечивающая возможность получить центральную длину волны усиленного спонтанного излучения около 840 нм и при этом сильно «раздвинуть» спектральные максимумы, соответствующие квантовым переходам из основного и возбужденного состояний. Решение данной задачи невозможно при использовании традиционных для гетероструктур данного спектрального диапазона квантовых ям из GaAs. Проведенные расчеты показали, что практическая реализация указанных параметров требует использования напряженных сверхтонких квантовых ям из твердого раствора (InGa)As с небольшим содержанием In. Такой подход позволяет увеличить высоту потенциального барьера квантовой ямы, что в совокупности с ее малой шириной дает возможность увеличить расстояние между уровнями размерного квантования до нужных значений, сохраняя положение центральной длины волны излучения. В расчетах использовалась модель прямоугольной квантовой ямы.

Эпитаксиальная гетероструктура (InGa)As/(AlGa)As с одной квантовой ямой (Рис. 1.3.1) была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии, описанном в первом разделе данной главы. Конструкция СЛД была традиционной. Активный канал представлял собой гребневидный волновод шириной 4 мкм, ось которого имела наклон 7° по отношению к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены антиотражающие покрытия.



Рис. 1.3.1 Зонная диаграмма исследованной РО ДГС.

Измерения проводились в непрерывном режиме инжекции при комнатных температурах. Как и следовало ожидать, выравнивание спектральных максимумов удалось получить только у СЛД с малыми длинами активных каналов $(L_a \leq 700 \text{ мкм})$. Ватт-амперные характеристики СЛД представлены на Рис. 1.3.2. К сожалению, в ходе постростовой обработки гетероэпитаксиальной пластины была неудачно выполнена операция изготовления омического р-контакта. По этой причине диоды обладали повышенным дифференциальным электрическим сопротивлением, что наряду с высоким тепловым сопротивлением, характерным

для образцов малых размеров, привело к тому, что при плотностях тока инжекции более 5 кА/см² наблюдалось тепловое насыщение выходной мощности.

Выравнивание спектральных максимумов происходило при плотности тока 10 – 11 кА/см². Выходная мощность заметно зависела от рабочей температуры, тогда как спектральные характеристики при изменении температуры на 10 °C оставались практически неизменными (Табл. 1.3.1).

Т	La	Ι	J	P _{FS}	P _{SM}	λ	$\Delta\lambda$	SF	L _c
°C	(мкм)	(мА)	$(\kappa A/cm^2)$	(мВт)	(мВт)	(нм)	(нм)	(%)	(мкм)
25	400	175	10,9	1	0,3	830	102	20	6,8
	500	230	11,5	1,4	0,5	832	99	27	7
	600	280	11,7	2,5	1	834	94	34	7,4
	700	350	12,5	4	1,6	836	92	40	7,6
15	400	156	9,4	1,1	0,3	829	101	21	6,8
	500	297	10	2	0,7	831	98	28	7
	600	250	10,4	3,3	1,3	833	94	35	7,4
	700	306	10,7	5,4	2,2	835	92	42	7,6

Табл. 1.3.1 Характеристики СЛД с активным слоем состава In_{0.04}Ga_{0.96}As с различными длинами активных каналов при выровненных спектральных максимумах. (Обозначения те же, что и в Табл. 1.1.1)



Рис. 1.3.2. Ватт-амперные характеристики СЛД с различными длинами активного канала L_a (400 мкм (1), 500 мкм(2), 600 мкм (3), 700 мкм (4) при температурах +25°C(а) и +15°C (б); отмечены рабочие точки, соответствующие выровненным спектральным максимам)

Примеры спектров максимальной ширины и соответствующие им автокорреляционные функции интенсивности для образцов длиной 400 и 700 мкм приведены на Рис. 1.3.3. Полуширины спектров около 100 нм для СЛД данного спектрального диапазона являются рекордными. Уровень непрерывной выходной мощности порядка единиц милливатт достаточен для ряда метрологических применений и для некоторых систем ОКТ. Предварительные ресурсные испытания исследованных СЛД позволяют оценить их срок службы (около 500 часов). Такой срок приемлем только для приборов, предназначенных для лабораторных исследований.

Сама по себе плотность рабочего тока инжекции 10⁴ A/см² не является запредельной для СЛД. Мы не сомневаемся В TOM, что улучшение электрофизических характеристик СЛД на основе данной наногетероструктуры повысить ИХ выходную мощность и обеспечить позволит приемлемую надежность. В свое время обзорная статья [82] получила название «Towards 100nm-wide SLDs at 840 nm band». Данная разработка – заметный шаг в указанном направлении.



Рис. 1.3.3 Спектры излучения максимальной ширины (а) и центральные пики соответствующих АКФ (б) для СЛД с $L_a = 400$ (1) и 700 (2) мкм

1.4 Пространственно - одномодовые СЛД с центральными длинами волн 790 нм, 840 нм, 960 нм, 1060 нм с непрерывной выходной оптической мощности до 100 мВт

Введение

Для многих практических применений суперлюминесцентных диодов (СЛД) выходная оптическая мощность является ключевым параметром. При этом в большинстве случаев предпочтение отдается светоизлучающим модулям на основе пространственно-одномодовых СЛД, у которых расходимость излучения соответствует дифракционным пределам.

В настоящее время на оптоэлектронном рынке имеется огромный выбор лазерных диодов (ЛД) поперечно-одномодовых различных спектральных диапазонов с непрерывной выходной мощностью в сотни мВт. Уровень мощности коммерчески доступных СЛД значительно скромнее. Это связано с более низкой внешней квантовой эффективностью СЛД, а также с тем, что из-за более высокой концентрации неравновесных носителей заряда в рабочих режимах они обладают меньшими порогами катастрофической оптической деградации (КОД), а процессы старения в них протекают быстрее, чем в ЛД. Количества публикаций, посвященных совершенствованию мощностных характеристик ЛД и СЛД несоизмеримы. Тем не менее, за последние 20 лет опубликовано немало результатов экспериментальных работ, в которых реализованы одномодовые СЛД ИК-диапазона спектра с непрерывной выходной мощностью, превышающей 100 мВт (см., например, [99,100,101,102,103,104]). Проблема надежности этих приборов обычно не рассматривается. Указанный уровень мощности до настоящего времени был достигнут только для серийных СЛД-модулей с длиной волны излучения около 1300 нм производства фирмы DenseLight. Что же касается СЛД «ближайшего» ИК-диапазона спектра 750-1100 нм, то, несмотря на их более высокую эффективность, выходная мощность серийно выпускаемых СЛДмодулей не превышает 60 мВт (производители: EXALOS, InPhenix, DenseLight, Optoenergy Inc, OOO «Суперлюминесцентные диоды». и др.).

Очевидным путем повышения выходной мощности является изготовление СЛД с «широким» многомодовым активным каналом. Однако расходимость их излучения в плоскости р-п перехода сильно превышает дифракционный предел [105], что во многих случаях представляет серьёзное препятствие для их практического применения. То же относится и к наборам СЛД в интегральном исполнении [106]. Радикальное решение проблемы – это использование МОРА-систем, в которых в качестве задающих генераторов используются СЛД, а в качестве усилителей мощности – полупроводниковые оптические усилители (ПОУ) с клиновидным активным каналом, обладающие расходимостью излучения, близкой к дифракционной. Например, фирмы Toptica и Sacher Lasertechnik выпускают обширную гамму таких ПОУ для различных спектральных диапазонов. При мощности входного сигнала 5-50 мВт они непрерывную выходную мощность 3 обеспечивают ЛО Bt. Указанные МОРА-системы, как правило, содержат фокусирующую и коллимирующую оптику, а также оптический изолятор между СЛД и ПОУ. Это отдельный класс приборов, относительно крупногабаритных и дорогостоящих. Эксперименты по реализации подобных систем в интегральном исполнении без использования оптической изоляции [107], насколько нам известно, не имели практических последствий.

Весьма интересна конструкция СЛД, в которой активный канал представляет собой многомодовый интерферометр [108,109]. Такие СЛД обладают дифракционной расходимостью излучения и при этом позволяют значительно повысить выходную мощность и снизить токовую нагрузку за счет увеличения объёма активного канала по сравнению с традиционными «узкими» СЛД. К сожалению, данная конструкция не решает проблемы КОД, связанной с разрушением торцевых граней.

В настоящей работе исследованы СЛД традиционной конструкции ближнего ИК-диапазона спектра. При их изготовлении были использованы четыре высокосовершенные полупроводниковые наногетероструктуры, выращенные методом газотранспортной эпитаксии из металлоорганических соединений, и оптимизированная технология формирования активных каналов и ионной очистки торцевых граней перед нанесением антиотражающих покрытий. Это позволило повысить внешнюю эффективность СЛД и их пороги КОД. Миниатюрные светоизлучающие модули на основе разработанных СЛД продемонстрировали достаточно высокую надёжность при непрерывной выходной оптической мощности до 100 мВт.

Экспериментальные образцы и их оптико-физические характеристики

Полупроводниковые наногетероструктуры с квантоворазмерными активными слоями и раздельным ограничением, использованные при изготовлении исследованных СЛД, были специально выращены на установках МОС-гидридной эпитаксии СИГМОС и AIXTRON. Их основные структурные параметры представлены в Табл. 1.4.1.

Все экспериментальные образцы имели одинаковую конструкцию. Их прямой активный канал представлял собой гребневидный световод длиной 1500 мкм и шириной 4 мкм, расположенный под углом 7° относительно нормали к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены антиотражающие покрытия. Как известно, в квантоворазмерных СЛД, у которых толщина слоя концентрациях активного составляет единицы HM, при высоких неравновесных носителей заряда заполняются не только основная, но и возбужденные подзоны энергетического спектра. В результате спектр усиленного спонтанного излучения приобретает характерную, обычно двугорбую, форму. У исследованных СЛД этого не наблюдалось. Вплоть до плотности тока инжекции порядка 10⁴ А/см² их спектры излучения имели колоколообразную квазигауссову форму [110], свидетельствующую о том, что вклад в суперлюминесценцию дают только квантовые переходы из основной подзоны. Заполнению возбужденных подзон в данном случае препятствуют высокая квантовая эффективность и большая длина активного канала (большое однопроходное оптическое усиление), приводящие к эффективному «сбросу» инверсии. В Табл. 1.4.1 представлены

также основные спектральные параметры исследованных СЛД в рабочих режимах, соответствующих непрерывной выходной мощности 100 мВт. Порог КОД, связанный, как правило, с разрушением торцевых граней, у СЛД типов I-III составлял 200-220 мВт. У образцов типа IV КОД не наблюдалась: с ростом тока инжекции происходило тепловое насыщение выходной мощности.

Тип СЛД	Состав и толщина активного слоя, нм	Состав и толщина волноводного слоя, мкм	I _{SLD} (мА)	λ _m (нм)	Δλ (нм)	Ripple (%)	Порог КОД (мВт/мА)
Ι	GaAs 3.5	Al _x Ga _{1-x} As X=0.250.5; 0.3	300	795	16	2-3	200/700
II	GaAs 9.0	Al _{0.3} Ga _{0.7} As 0.25	360	840	25	3-4	220/700
III	In _{0.2} Ga _{0.8} As 6.0	Al _x Ga _{1-x} As X=00.5; 0.4	370	960	50	4-6	220/800
IV	In _{0.35} Ga _{0.65} As 2x7.0	Al _{0.25} Ga _{0.75} As 0.5	425	1060	40	5-7	Перегрев без КОД

Табл. 1.4.1 Основные структурные параметры и типичные технические характеристики исследованных СЛД. Примечание: I_{SLD} - ток инжекции, обеспечивающий $P_{FS} = 100$ мВт при 25° С и соответствующие спектральные характеристики: λ_m - медианная длина волны; $\Delta\lambda$ - полуширина спектра; Ripple - глубина остаточной модуляции спектра модами Фабри-Перо.

Типичные Ватт-Амперные характеристики исследованных СЛД представлены на Рис. 1.4.2, а их спектры излучения на Рис. 1.4.3.



Рис. 1.4.2 Вт-А характеристики при 25°С исследованных СЛД.



Рис. 1.4.3 Спектры излучения при выходной мощности 100 мВт исследованных СЛД.

Рис. 1.4.4 иллюстрирует типичное дальнее поле излучения. На нем представлены сечение выходного пучка (а) и угловые зависимости интенсивности излучения в плоскостях перпендикулярной (б) и параллельной (в) гетерослоям. Как уже обсуждалось во введении, реализованные мощностные параметры для СЛД ближнего ИК-диапазона спектра сами по себе не являются рекордными. Главным достижением данной работы является демонстрация достаточно высокой надежности разработанных приборов в указанных рабочих режимах. На Рис. 1.4.5 представлены хронограммы предварительных ресурсных испытаний СЛД типа II (а), типа III (б) и типа IV (в) при токе инжекции 400 мА. Экстраполяция приведенных зависимостей позволяет получить для медианного срока службы (МТТF) оценки около 15000, 11000 и 40000 часов соответственно. СЛД типа I в настоящее время проходят аналогичные испытания. По предварительным оценкам их МТТF также превышает 10000 час.



Рис. 1.4.4 Типичное излучения (сечение дальнее поле пучка И (1)распределения интенсивности плоскостях, перпендикулярной В И параллельной гетерограницам (2)).


Рис. 1.4.5 Хронограммы предварительных ресурсных испытаний СЛД типа II (а), типа III (б) и типа IV (в) при рабочем токе 400 мА.

Миниатюрные светоизлучающие модули.

В результате проведенных исследований были разработаны светоизлучающие модули в стандартных корпусах ТОW и TO-9 (Рис. 1.4.6).



Рис. 1.4.6 Фотография корпусов TOW и TO-9

В приборах 1-го типа кроме СЛД размещены термоэлектрический микроохладитель (ТЭМО), термистор и фотодиод-монитор, что позволяет использовать стандартные электронные контроллеры, обеспечивающие термостабилизацию и автоматический контроль выходной мощности (АКМ). Хронограммы на Рис. 1.4.7 иллюстрируют выход ТЭМО на стационарный режим термостабилизации на уровне 25 °C при рабочих токах СЛД 300 мА (а) и 400 мА (б) для различных температур окружающей среды. Приведенные зависимости показывают, что, по крайней мере, до температуры 55 °C эти модули могут обеспечить выходные характеристики СЛД, представленные на Рис. 1.4.2 и Рис. 1.4.3. Очевидно, что использование более крупногабаритного корпуса и

более производительного ТЭМО позволит значительно расширить диапазон допустимых рабочих температур.

Модули 2-го типа содержат только СЛД и фотодиод-монитор. При использовании внешней системы термостабилизации они также обеспечивают вышеуказанные выходные характеристики. Если же они эксплуатируются, будучи просто смонтированными на достаточно массивном радиаторе, то выходные оптические характеристики изменяются с изменением температуры окружающей среды. С ростом температуры выходная мощность падает, а центральная длина волны и ширина спектра растут. Эти изменения иллюстрируются на примере модулей в корпусах ТО-9 на основе СЛД типа II (Рис. 1.4.7, Рис. 1.4.8, Рис. 1.4.9). В этом году начат серийный выпуск именно этих приборов (модель SLD-340-UHP, см. приложение).



Рис. 1.4.7 Переходные процессы при включении ТЭМО. Рабочие токи инжекции 300 мА (а) и 400 мА (б), термостабилизация на уровне 25°С при температуре окружающей среды 25 °С (1), 45 °С (2), 55 °С (3) и 65 °С (4).



Рис.1.4.8

Вт-А характеристики при различных температурах



Рис. 1.4.9 Зависимости центральной длины волны (а) и ширины спектра (б) от температуры при выходной мощности 5 мВт (1), 10 мВт (2) и 50 мВт (3) для СЛД типа II в корпусе ТО-9 (радиатор без термостабилизации).

Заключение

Исследованы прототипы миниатюрных пространственно-одномодовых СЛД-модулей с центральными длинами волн 790 нм, 840 нм, 960 нм и 1060 нм. Показано, что при непрерывной выходной оптической мощности 100 мВт их срок службы превышает 10000 час. По уровню выходной мощности эти модули превосходят коммерчески доступные аналоги приблизительно в 2 раза.

Глава 2 Новые комбинированные источники сверхширокополосного излучения «ближайшего» ИК – диапазона спектра но основе разработанных СЛД

Введение.

В данной главе приведены результаты по разработке новых типов широкополосных источников света на основе объединения излучения суперлюминесцентных диодов различных спектральных диапазонов с помощью широкополосных оптических разветвителей. Выходная мощность и спектральные параметры таких приборов, значительно превышающие по ширине спектра одиночных серийно выпускаемых СЛД - модулей, могут быть выбраны и реализованы в широких пределах в зависимости от требований, предъявляемых к данному источнику излучения. При этом, выходные параметры определяются и ограничиваются лишь конкретной комбинацией используемых для объединения СЛД-модулей.

Подобные приборы, объединяющие излучение нескольких СЛД [111, 112, 113,114], позволяют значительно расширить спектральную полосу излучения по сравнению С обычными «одиночными» СЛД-модулями. Они позволяют увеличить потенциальные возможности для целого ряда практических областей применения, таких оптическая когерентная томография, волоконнокак оптическая гироскопия, различные метрологические системы, используемые, в частности, для характеризации волоконно-оптических компонентов, различные применения интерферометрии «белого света» и т.д. Однако, при реализации подобной идеи на практике, необходимо принять во внимание целый ряд аспектов.

Во-первых, необходимо правильно подобрать и настроить подходящую для объединения комбинацию СЛД. Критерии такого подбора заключаются в том, что спектры излучения объединяемых приборов должны находиться в требуемом конкретной задачей спектральном диапазоне. Целесообразно, чтобы спектры

излучения СЛД были бы, по возможности, широкополосными. Спектральные полосы излучения приборов должны быть частично перекрывающимися, а спектральные плотности мощности в областях центральных длин волн данных СЛД должны быть близки по величине. Таким образом, все вышеперечисленные факторы должны быть учтены с тем расчётом, чтобы при объединении данной комбинации источников излучения получить на выходе оптимальную комбинацию суммарной выходной мощности излучения, ширины спектра излучения и его формы. Последняя, при этом, должна быть, по возможности, гладкой, без резких спектральных провалов и пиков. Естественно, что для выполнения вышеперечисленных условий требуется проведение предварительной исследовательской работы, заключающейся в выборе гетероэпитаксиальных основе которых изготавливаются СЛД. структур, на И оптимизации конструктивных параметров и рабочих режимов отдельных излучателей, с целью получения требуемых выходных параметров приборов.

Немаловажным моментом при выборе излучателей СЛД и соответствующих гетероэпитаксиальных структур, является надёжность получаемых приборов, их наработка на отказ при заданных режимах эксплуатации. Необходимо учитывать деградационную временную динамику выходных мощностных и спектральных параметров СЛД для автоматической корректировки их режимов работы с целью сохранения первоначальных параметров широкополосных источников.

Важнейшим технологическим аспектом при создании данных приборов является то, что СЛД – это широкополосные источники оптического излучения, а суперпозиция их спектральных полос имеет ещё более широкий спектр. Поэтому СЛД, при объединении излучения различных подобранных ПО вышеперечисленным критериям, требуется использование И применение специальных широкополосных оптических разветвителей. Использование именно широкополосных оптических разветвителей позволяет резко сократить суммарные проходные потери излучения, а также не искажать исходные формы объединения СЛД. К применяемых ДЛЯ таким разветвителям спектров

предъявляются следующие требования: они должны быть волоконными (т. е. на входных и выходных портах разветвителей должны быть оптические волокна, к которым в последующем с помощью оптических волоконных соединителей, проходных разъёмов и методов волоконной сварки в электрической дуге можно будет присоединить выходные оптические волокна СЛД - модулей); разветвители должны надёжно обеспечивать требуемый коэффициент деления оптической мощности излучения в широкой спектральной полосе, должны обладать минимальными вносимыми проходными потерями также в широкой спектральной полосе; конструкция таких разветвителей должна быть миниатюрной, сами разветвители должны быть надёжны и стабильны по своим параметрам как во времени, так и в широком диапазоне внешних условий эксплуатации.

Простейшая принципиальная схема широкополосного источника на основе объединения двух различных СЛД с помощью оптического волоконного Х- или Y- разветвителя приведена на Рис. 2.1.1 (1). В данную схему могут быть включены и дополнительные оптические элементы, такие как оптические аттенюаторы или изоляторы (Рис. 2.1.1 (2)). При этом интеграция оптических каждое из входных плеч прибора аттенюаторов В даст возможность дополнительной настройки выходных спектральных его И мощностных параметров, поскольку вышеперечисленные методы варьирования входных параметров СЛД имеют ряд ограничений. Включение же в оптическую схему оптического изолятора позволит избежать нежелательных эффектов, обусловленных обратными связями по излучению, которые могут возникать при практическом использовании данных приборов, например, В различных интерферометрических схемах, и приводить к «перекосам» оптической мощности СЛД и даже их выходу из строя из-за оптического пробоя.



Рис. 2.1.1 Принципиальные схемы широкополосных источников света: на основе объединения двух СЛД с помощью Х- или Y- разветвителя (1); на основе объединения двух СЛД с добавлением в оптическую схему прибора дополнительных оптических элементов (аттенюаторов и изолятора) (2).

Методом волоконной сварки в электрической дуге с помощью аппарата Fujikura MC-20 выходные одномодовые волокна СЛД - модулей крепились к входным волоконным портам оптических разветвителей. Вносимые потери на каждой сварке составляли не более 0.1 дБ. Выходные волоконные порты оптических световодов были оснащены стандартными волоконными оптическими разъёмами типа FC/APC с закошенным торцом на выходе для уменьшения обратных отражений излучения. После проведения необходимых сварок выходных волокон СЛД - модулей к оптическим разветвителям, сами модули жёстко крепились на электрические разъёмы и радиаторы, а оптические

разветвители на специальные держатели, которые, в свою очередь, были жёстко зафиксированы на оптической плате прибора. Свободные участки волокон, помещённых в защитные полимерные трубки, накручивались на волоконные катушки, которые также были жёстко зафиксированы на оптической плате прибора. Таким образом, вся оптическая конструкция представляла собой миниатюрную плату с жёстко зафиксированными на ней элементами. Кроме того, на оптической плате были установлены электрические разъёмы для управления СЛД- модулями. Используемая конструкция не предполагала интеграцию в оптическую часть прибора дополнительных пассивных компонентов, таких как оптические аттенюаторы, при этом окончательные выходные параметры прибора настраивались только с помощью варьирования рабочих режимов СЛД- модулей.

СЛЛ модули управлялись стабилизированным калиброванным источником постоянного тока, при этом режим инжекции соответствовал режиму поддержания постоянной оптической мощности с помощью встроенного обратной связи, вмонтированного непосредственно в фотодиода корпус СЛД-модуля. Реализация режима поддержания постоянной мощности давала возможность дополнительной защиты от воздействия обратных связей по излучению, и, кроме того, позволяла компенсировать влияние деградационных процессов на выходные параметры СЛД-модулей путём автоматической корректировки уровня инжекции. Источники постоянного тока, электронные схемы поддержания режима постоянной мощности, а также схемы автоматической стабилизации и поддержания температуры были интегрированы в единый корпус прибора.

Измерения выходной оптической мощности проводились калиброванным и аттестованным измерителем мощности ILX ОММ-6810В. Для регистрации и записи спектров излучения использовался оптический анализатор спектра ANDO AQ6317В. При этом спектры излучения измерялись с оптическим спектральным разрешением не хуже 0.2 нм, а при измерениях спектральной модуляции – не хуже 0.02 нм. Для регистрации и записи функций когерентности излучения

использовался оптический анализатор ADVANTEST Q8347 на основе интерферометра Майкельсона.

2.1 Комбинированные источники света с колоколообразной формой спектра BroadLighter-860-G.

Как известно, суперпозиция 2-х смещенных спектров гауссовой формы, близких по полуширине, позволяет при определенных условиях получить спектр колоколообразной формы, полуширина которого близка к сумме полуширин слагаемых спектров. Форма такого спектра слабо отличается от гауссовой, а АКΦ практически отсутствует. Именно такой подход был «пьедестал» исследовании прототипов использован при новых двухканальных комбинированных источников света на основе разработанных в первой главе СЛД-модулей с выводом излучения через ОВС. Для объединения выходных ОВС применялись серийные разветвители сплавного типа с коэффициентами деления 50:50 или 40:60 для соответствующих центральных длин волн. Рис. 2.2.1 иллюстрирует процесс оптимизации формы спектра выходного излучения одного из исследованных прототипов. В данном случае суммировалось излучение 2-х модулей на основе СЛД типа II и типа IV с L_a=1100 мкм (см. Табл. 1.1.2). Формой результирующего спектра можно в широких пределах управлять, изменяя токи инжекции и рабочие температуры СЛД, а также используя ОВС-разветвители с зависимостями коэффициента деления от различными длины ВОЛНЫ. В рассматриваемом случае ставилась задача получения «чистой» АКФ при максимальной достижимой ширине спектра и P_{SM} > 5,0 мВт.



Рис. 2.2.1 Суперпозиция спектров излучения СЛД типа II и типа IV в различных рабочих режимах (а) и соответствующие центральные пики АКФ (б).

2.2.1 В Табл. технические приведены основные характеристики реализованных прототипов. Указанные комбинации параметров при колоколообразной реализованы форме спектра впервые. Среди серийно приборов серии BroadLighter наибольшей выпускаемых популярностью пользуется модель D-840-HP с полушириной спектра около 100 нм. На Рис. 2.2.2 представлены спектры излучения и АКФ этого прибора и новой модели (предварительное наименование – D-860-G, см. приложение). Есть все основания полагать, что для ОКТ-систем новый прибор окажется предпочтительным.

Тите СПЛ	I (see s)	P _{SM}	λ_{m}	Δλ	L _C
типы Слд	L _a (MKM)	(мВт)	(нм)	(нм)	(мкм)
	900	3.0	830	70	9.8
I + II					
	1100	8.0	830	65	10.5
I + III	700	1.0	830	100	69
	,	1.0	020	100	0.9
	1100	7.0	860	80	9.2
II + IV					
	1300	20	860	70	10.5

Табл. 2.2.1 Примеры основных характеристик комбинированных источников света с колоколообразной формой спектра на основе разработанных СЛД.



Рис. 2.2.2 Спектры выходного излучения (а) и центральные пики АКФ (б) серийного источника модели BroadLighter D-840 (пунктир) и новой модели (предварительно – D-860-G).

2.2 BroadLighter-880-MP

Данный раздел посвящён новому сверхширокополосному комбинированному двухканальному источнику излучения на основе ранее изученных широкополосных СЛД спектрального диапазона 750-1050 нм. Для первого канала использовался усовершенствованный СЛД-модуль на основе SLD-351-MP с центральной длиной волны 820 нм, спектр которого представлен на Рис. 2.3.1 (а). Во втором канале был использован модуль на основе SLD-471-MP с центральной длиной волны 920 нм. Его спектр показан на Рис. 2.3.1 (б). Широкополосность спектров использованных СЛД позволила получить спектр шириной около 200 нм при неоднородностях примерно 2 дБ, представленный на Рис. 2.3.2.

Широкая полоса и короткая медианная длина волны вкупе с достаточно низкой степенью неоднородности спектра позволили получить приемлемую АКФ с шириной центрального пика 3,6 мкм (Рис. 2.3.3).



Рис. 2.3.1 Типичные спектры излучения СЛД, использованных в составе прибора BroadLighter D-880-MP. SLD-351-MP (а), SLD-471-MP (б).



Рис. 2.3.2 Суммарный спектр излучения комбинированного источника излучения BroadLighter D-880-MP

В Табл. 2.3.1 представлены основные технические характеристики полученного источника света.

	т .
	I ипичные
Параметры	
	значения
Выходная мошность через одномодовое волокно, мВт	1.5
r	
Пентральная длина волны им	880
Lompanbhan Zimna Boimbi, mit	000
Полуширина спектра нм	200
riony milprina enekripa, ma	200
Остаточная молуляция молами Фабри-Перо %	0.5
ooraro man modysmidim modamir 4 aopir riepo, 70	0.0
Спектральные неолноролности %	40
eneripainine neodnopodnoem, vo	10
Лопгосрочная стабильность %	±0.5
	-0.0
Краткосрочная стабильность. %	±0.1

Табл. 2.3.1 Основные технические характеристики прибора BroadLighter D-880-MP (см. приложение)



Рис. 2.3.3 АКФ излучения источника света BroadLighter D-880-MP: центральный пик (а), панорамный вид (б).

Для определения долгосрочной стабильности измерения проводились каждую минуту в течение 8 часов с временем интеграции 100 мс, а для определения краткосрочной стабильности – каждую секунду в течение 15 минут с временем интеграции также 100 мс. Все измерения начинались после одного часа прогрева при температуре окружающей среды 22 ± 0.5 °C.

Благодаря небольшой выходной мощности (малому оптическому усилению) использованных СЛД прибор получился практически невосприимчивым к обратной связи. И если в большинстве комбинированных источников излучения серии BroadLighter обязательно требуется наличие выходного оптического изолятора, то для новой разработанной модели такой необходимости нет, следовательно, прибор становится меньше, легче и дешевле. На Рис. 2.3.4 продемонстрировано, что форма спектра излучения и центрального пика АКФ практически не меняется при наличии положительной обратной связи в -14 дБ (4%), образованной отражением от прямого скола на торце выходного оптического волокна. Выходная мощность при этом уменьшается всего на 3-4 % (Рис 2.3.5 (a)). Обычно приборы данной серии работают в режиме автоматического контроля мощности (АКМ), в котором подстройка токов инжекции контролируется с помощью встроенных в СЛД-модули фотодиодов. При обратной связи в 4% фототок может вырасти достаточно сильно (Рис. 2.3.5 (б)), что при подстройке тока приведёт к серьёзному искажению спектра. Для решения данной проблемы можно или работать в режиме автоматического контроля тока (АКТ) или же вместо встроенных контролирующих фотодиодов использовать волоконные датчики мощности на выходе модулей. Так как выходная мощность меняется незначительно, то спектр практически не будет искажаться. Помимо экспериментов с обратной связью на прямом сколе, также проводились испытания при большем уровне обратной связи. Схема для подобного измерения представлена на рисунке 2.3.6. Излучение от источника разделялось широкополосным 50:50 оптоволоконным разветвителем, в итоге 50% мощности шло в выходной световод и в зависимости от настройки аттенюатора до 15% мощности могло возвращаться в BroadLighter. Эксперимент показал, что рассматриваемый источник света практически невосприимчив даже к 15% обратной связи. На Рис 2.3.7 продемонстрированы спектры излучения без обратной связи и с 15% отражением.



Рис. 2.3.4 Спектры излучения и соответствующие центральные пики АКФ при наличии обратной связи (соответственно (б) и (г)) и без неё ((а) и (в)).



Рис. 2.3.5 Ватт-Амперные характеристики (а) и зависимости фототока от тока накачки (б) при наличии 4% обратной связи (2) и без неё (1).



Рис. 2.3.6 Схема для измерения характеристик источника излучения при уровнях обратной связи до 15%.



Рис. 2.3.7 Спектр излучения без обратной связи (а) и с 15% отражением (б).

Малая мощность хоть и позволяет практически игнорировать возможную обратную связь, но при этом может негативно сказаться на относительном шуме интенсивности (RIN), который определяется, как:

$$RIN = \frac{\left\langle \Delta N \right\rangle^2}{\left\langle N_0 \right\rangle^2} \quad , \tag{2.2.1}$$

где $<\Delta N >^2$ – средняя квадратичная флуктуация числа фотонов на единичный частотный интервал, а $< N_0 >^2$ – квадрат среднего числа фотонов.

На практике необходимо добиваться минимизации значения RIN, которое негативно сказывается на соотношении сигнал-шум. Измерения же этой величины показали, что новый прибор имеет RIN на уровне -140 дБ/Гц (Рис. 2.3.8), что соответствует уровню большинства приборов такого класса. Измерения проводились с помощью быстродействующего фотодиода, и радиочастотного анализатора спектра Rohde & Schwarz FS3. Расчёт производился по формуле (2.2.2) приведённой ниже.

$$RIN = 10 * \log \frac{(10^{S_c} - 10^{S_{\phi}}) - 2qI_{\phi}R_{\Im}\Delta f}{I_{\phi}^2 R_{\Im}}, \qquad (2.2.2)$$

где S_c и S_{ϕ} – уровни шума сигнала и фона соответственно, q – заряд электрона, I_{ϕ} – ток, протекающий через фотодиод, R_3 – суммарное сопротивление на входе спектроанализатора, Δf – полоса частот в которой измерялся шум. (член $2q I_{\phi} R_3 \Delta f$ – описывает дробовой шум в системе)



Рис. 2.3.8 Относительная мощность шума в полосе частот от 0 до 1 МГц.

Прибор может быть реализован в двух модификациях: в традиционной модификации с питанием от сети переменного тока напряжением 110В или 220В и в миниатюрной модификации с питанием от постоянного напряжения +5В. В обоих вариантах включение прибора может осуществляться вручную или дистанционно через интерфейс RS-232. Этот интерфейс также позволяет осуществлять контроль рабочих режимов СЛД-модулей.

Глава 3. Широкополосный ПОУ-модуль с центральной длиной волны 1060 нм и быстроперестраиваемый лазер на его основе

Введение

В данной главе описан новый ПОУ бегущей волны с центральной длиной волны 1060 нм и радикально улучшенный на его основе быстроперестраиваемый лазер. Перестраиваемые лазеры спектрального диапазона 1000-1100 нм также нашли своё применение в ОКТ, такое излучение глубже проникает в глазное дно и позволяет получить больше информации о некоторых патологиях глаза. В указанной полосе имеется второе «окно прозрачности» глазной жидкости. К сожалению, достаточно эффективные фотоприемные ПЗС-линейки для указанной полосы спектра пока отсутствуют. Поэтому приходится использовать более сложную схему ОКТ с одиночным фотоприемником и спектрально свипирующим лазером в качестве источника излучения. Кроме этого ОКТ указанного диапазона используется в дерматологии.

3.1 Оптико-физические характеристики ПОУ бегущей волны на основе наногетероструктуры с активными слоями состава In_{0.35}Ga_{0.65}As Введение

В отличие от светодиодов, ЛД и СЛД, у которых выходная оптическая мощность и спектр излучения при заданной температуре для каждого конкретного прибора определяется только током инжекции, выходные характеристики ПОУ сильно зависят также от мощности и формы спектра входного сигнала. К основным техническим характеристикам ПОУ относятся:

- Спектры коэффициента оптического усиления, которые обычно измеряются в режиме линейного усиления при малых узкополосных входных сигналах, при различных уровнях накачки.
- Полоса усиления ширина контура оптического усиления по уровню -3 дБ.

- Передаточные характеристики зависимости выходной оптической мощности от входной при различных длинах волн входного сигнала и различных уровнях накачки
- Чувствительность минимальная входная мощность, приводящая к увеличению выходной мощности на заданную величину (сильно зависит от спектра входного сигнала).
- Максимальная выходная мощность, которая определяется перегревом или порогом катастрофической оптической деградации ПОУ.
- Мощность насыщения входная мощность, приводящая к уменьшению коэффициента усиления на 3 дБ (сильно зависит от длины волны входного сигнала и уровня накачки)
- Превышение спектральной яркости полезного выходного сигнала над уровнем суперлюминесцентного фона.
- Шум-фактор превышение относительных шумов интенсивности выходного сигнала над соответствующими шумами входного.
- Быстродействие степень искажения временной формы входного сигнала после усиления.
- Поляризационная чувствительность зависимость коэффициента оптического усиления от степени и направления поляризации входного сигнала.
- Степень остаточной паразитной модуляции контура усиления модами Фабри-Перо.

В зависимости от назначения ПОУ определяющими являются те или иные из перечисленных характеристик.

Экспериментальные образцы и их физические характеристики

В данной главе представлены результаты исследования полупроводниковых оптических усилителей спектрального диапазона 1010-1110 нм на основе ДКРС в системе (InGa)As. Конфигурация активного канала исследованных ПОУ не отличалась от используемой в СЛД традиционной конструкции (см. раздел 1.1)

[115]. Он представлял собой прямой гребневидный волновод шириной около 4 мкм, имеющий наклон 7⁰ относительно нормалей к торцевым граням кристалла, нанесены двухслойные антиотражающие которые были покрытия, на обеспечивающие эффективный коэффициент отражения порядка 10⁻⁴. Процедура разработки состояла в выращивании и постростовой обработке новой наногетероструктуры с требуемыми оптическими свойствами, изготовлении на её основе экспериментальных образцов ПОУ, их исследовании, выборе оптимальной длины активного канала L_a, сборке и характеризации ПОУ-модулей.

ПОУ-модули бегущей волны отличаются светоизлучающих OT СЛД-модулей более сложной конструкцией и более трудоемкой технологией сборки. Главное отличие состоит в наличии двух, вместо одного, прецизионных выходным V3ЛОВ стыковки с входным И одномодовыми волоконными световодами (OBC). Кристаллы ПОУ монтировались на специальных теплопроводах, обеспечивающих удобный доступ торцевых микролинз ОВС к Сборка производилась в торцам активного канала. корпусах Butterfly, содержащих микроохладители Пельтье и термисторы, предназначенные для термостабилизации ПОУ. В ходе данной работы проведены технологические исследования по определению оптимальной комбинации припоев с различными температурами плавления, используемых при сборке ПОУ-модуля. Уместно законченный модуль содержит девять паяных соединений, указать, что выполненных с использованием пяти различных припоев с температурами плавления от 104°C до 183°C. В результате проведенных исследований была отработана хорошо воспроизводимая технология сборки, обеспечивающая надежных герметичных модулей, работоспособных изготовление при температуре окружающей среды от -55°C до +70°C. Входные и выходные OBC изготавливались из изотропного волокна или волокна типа PANDA с длиной волны отсечки, соответствующей спектральной полосе усиления ПОУ, в данном случае из волокон типа Flexcore-1060 или PANDA-980. При необходимости они оконцовывались коннекторами типа FC/APC. Характеризация ПОУ-модулей

производилась в условиях термостабилизации при 25°C в непрерывном режиме инжекции.

Методика измерения основных технических характеристик ПОУ-модулей подробно описана в [87]. При проведении этих измерений используются два однотипных ПОУ-модуля, один из которых служит активным элементом перестраиваемого лазера, исполняющего роль генератора входного сигнала. На Рис. 3.2.1 представлен типичный спектр «чистого» однопроходного усиления (из OBC в OBC) разработанного ПОУ, измеренный при токе инжекции, реализующем максимальную полуширину спектра.



Рис. 3.2.1 Спектр однопроходного усиления (из OBC в OBC) разработанного ПОУ при максимальной полуширине спектра.

Следует отметить, что этот ток несколько выше, чем ток, реализующий выравнивание спектральных максимумов излучения квантоворазмерных СЛД на основе той же гетероструктуры. По нашему опыту коэффициент усиления G порядка 10 дБ достаточен для выполнения пороговых условий при помещении ПОУ во внешний резонатор с разумным уровнем диссипативных и излучательных

потерь. Исходя из этой оценки, эффективная полоса усиления рассматриваемого ПОУ составила около 100 нм.

Исследованный ПОУ был создан на основе двухслойной квантоворазмерной структуры (ДКРС) в системе (In_xGa_{1-x})As/GaAs с концентрацией In~0.35 в активных слоях толщиной 7 нм. На Рис. 3.2.2 представлена зонная диаграмма использованной гетероструктуры. Особенности геометрии и химического состава активных слоев, а также основные параметры ПОУ модуля отражены в Табл. 3.2.1.



Рис. 3.2.2 Зонная диаграмма исследуемой гетероструктуры.

Тип	Состав и толщина активного слоя	Длина активного канала, мкм	Диапазон, нм	Максима льное усиление, дБ	Максимальная выходная мощность, мВт
ДКРС	In _{0.35} Ga _{0.65} As 2x7.0 нм	1200	1010-1110	24	20

Табл. 3.2.1 Основные параметры разработанного ПОУ модуля.

В последнем столбце указана выходная мощность из OBC, при которой ПОУ-модули прошли предварительные ресурсные испытания в режиме СЛД.

Следует отметить, что выходная оптическая мощность в открытое пространство, соответствующая порогу катастрофической деградации, составляет у этих приборов до 150 мВт. Таким образом, могут быть реализованы заметно более высокие уровни выходной мощности (коэффициент ввода в ОВС составлял от 55 до 70%). Вопрос о том, как это отразится на сроке службы, требует отдельных исследований.

Ниже приводятся результаты измерений стационарных передаточных характеристик. Ширина спектра входного сигнала, поступавшего на вход ПОУ через оптический изолятор, не превышала 0.05 нм. Его мощность регулировалась в широких пределах с помощью управляемого оптоволоконного аттенюатора. Рис. 3.2.3 иллюстрирует эволюцию спектра усиления при мощностях входного сигнала, не превышающих – 15 дБм.



Рис. 3.2.3 Эволюция спектра усиления ПОУ при различных рабочих токах и соответствующих мощностях: $1 - I_{\Pi O Y} = 100 \text{ MA}$, $P_{ASE} = 1.2 \text{ MBT}$; $2 - I_{\Pi O Y} = 120 \text{ MA}$, $P_{ASE} = 2 \text{ MBT}$; $3 - I_{\Pi O Y} = 140 \text{ MA}$, $P_{ASE} = 3.5 \text{ MBT}$.

При малых токах инжекции достаточно высокое усиление наблюдается только в спектральной полосе, соответствующей квантовым переходам из основного состояния. С ростом уровня накачки в игру вступает возбужденная подзона. На Рис. 3.2.4 представлены зависимости выходной мощности ПОУ и его





Рис. 3.2.4 Зависимости выходной мощности ПОУ и его коэффициента усиления от мощности входного сигнала на длинах волн 1020 нм (а), 1055 нм (б) и 1090 нм (в), соответствующих краям и середине полосы усиления.

В режиме ручного или автоматического контроля выходной мощности (АКМ) она может поддерживаться на постоянном уровне за счет изменения тока инжекции ПОУ. При этом правда, изменяется степень превышения полезным сигналом суперлюминесцентного «пьедестала» (SMS).

Соответствующие спектры выходного излучения представлены на Рис. 3.2.5, а зависимости тока инжекции ПОУ и величины SMS от длины волны

входного сигнала на Рис. 3.2.6. В данном случае ПОУ работал в режиме насыщения усиления: G ≅ 14 дБ.



Рис. 3.2.5 Спектры выходного излучения при различных длинах волн входного сигнала.



Рис. 3.2.6 Зависимость величины SMS и тока инжекции ПОУ от длины волны входного сигнала при входной мощности 2 мВт и выходной 20 мВт (G~10 дБ).

Для практических применений важной спектральной характеристикой является доля полезной выходной мощности, сосредоточенная в центральном пике, определяемая как:

$$K_{S} = \int_{\lambda_{C}-\delta\lambda}^{\lambda_{C}+\delta\lambda} S(\lambda)d\lambda / (\int_{-\infty}^{+\infty} S(\lambda)d\lambda - \int_{\lambda_{C}-\delta\lambda}^{\lambda_{C}+\delta\lambda} S(\lambda)d\lambda), \qquad (3.1.1)$$

где S(λ) – спектр выходного излучения, λ_C – центральная длина волны входного сигнала, Δλ – спектральная полуширина входного сигнала.

Рис. 3.2.7 демонстрирует зависимость этой величины от длины волны. Видно, что она принимает максимальное значение на длине волны 1085 нм, а ее ширина по уровню 20 дБ (где мощность, сосредоточенная в пике, на два порядка превышает суперлюминесцентный пьедестал) составляет 40 нм.



Рис. 3.2.7 Соотношение интегральных мощностей усиленного сигнала и суперлюминесцентной составляющей при входном сигнале 2 мВт и постоянной выходной мощности 20 мВт.

На Рис. 3.2.8 представлены хронограммы ресурсных испытаний рассматриваемого ПОУ в двухпроходном режиме при выходной мощности 50 мВт. Приведенные кривые позволяют оценить срок службы величиной не менее, чем 10 000 часов. Это дало возможность приступить к выпуску новой модели ПОУ-модуля - SOA-542 (см. приложение). Ближайшим аналогом этого прибора является ПОУ-модуль на основе наногетероструктуры с квантовыми точками в активном слое – модель SOA-1060-100-PM-24dB производства немецкой компании INNOLUME GmbH. Серьёзным преимуществом SOA-542 является то, что он обладает в 3 раза более низким рабочим током инжекции.



Рис. 3.2.8 Хронограммы ресурсных испытаний.

Заключение.

Разработан и внедрён в серийное производство новый тип ПОУ-модуля повышенной мощности и широкополосности. В Табл. 3.2.2 представлены основные технические характеристики данного прибора.

Параметр	Значение
Максимальный ток накачки, мА	160
Напряжение, В	2,5
Максимальная выходная мощность, дБм	13
Центральная длинна волны λ_c , нм	1060
Максимальная ширина контура усиления по уровню -3 дБ, нм	75
Спектральный Ripple, дБ	<0.1
Максимальное оптическое усиление (G), дБ	25

Табл. 3.2.2 Основные параметры разработанного ПОУ-модуля SOA-542.

3.2 Быстроперестраиваемый лазер на основе разработанного ПОУ и акустооптического фильтра во внешнем кольцевом оптоволокном резонаторе

Ниже приводятся результаты исследования перестраиваемого лазера, в котором ПОУ-модуль, описанный в разделе 1 данной главы исполнял роль активного элемента. Внешний резонатор лазера был построен на основе оптоволокна с сохранением поляризации Corning PANDA 980. В качестве спектрально-селективного элемента был акустооптический использован перестраиваемый фильтр (АОПФ), с квазиколлинеарным взаимодействием оптической и акустической волн, подобный описанному в [116]. Хотя АОПФ обладает габаритами относительно крупными И относительно низким быстродействием, он имеет по сравнению с другими селективными элементами перестраиваемых лазеров неоспоримое преимущество – высокую точность и воспроизводимость навязываемой длины волны генерации, которая определяется частотой управляющего электронного ВЧ-генератора. В отличие от схем, описанных в [84], в данной работе был использован кольцевой оптоволоконный резонатор, содержащий совмещенный с АОПФ оптический изолятор, который обеспечивал однонаправленную генерацию. Такая схема позволяет получить более высокую выходную мощность, чем линейные схемы, в которых ПОУ работает в двухпроходном режиме. Исследованы два типа кольцевых схем, отличающихся расположением выходного оптоволоконного разветвителя (Рис. 3.3.1). При оптимизации схем были использованы широкополосные разветвители РМТС-06 (AFR Ltd.) с коэффициентами деления 50:50, 30:70 и 20:80. Оптимальное соотношение между пороговым током И внешней эффективностью получено для второго из них. В схеме 1-го типа он располагается после АОПФ, в схеме 2-го типа – непосредственно после ПОУ. Преимущество первой схемы – «чистый» спектр выходного излучения (SMS>55 дБ). Вторая схема позволяет реализовать более высокую выходную мощность, однако при этом в спектре выходного излучения присутствует суперлюминесцентный «пьедестал», высота которого изменяется при перестройке лазера. Отметим, что для многих практических применений величина SMS на уровне 30-40 дБ является приемлемой.



Рис. 3.3.1 Два типа кольцевых схем, отличающихся расположением выходного оптоволоконного разветвителя (1 – ПОУ-модуль; 2 – АОПФ; 3 – оптический изолятор; 4 – разветвитель 30:70; 5 – контроллер; 6 – фотодиод монитор системы АКМ).

В частности, упомянутые во введении к диссертации перестраиваемые лазеры на основе ЛД с просветленной гранью также не свободны от этого недостатка. Кроме того, для них характерна кусочно-непрерывная перестройка, тогда как рассматриваемые схемы обеспечивают непрерывную перестройку в пределах всей полосы усиления ПОУ.

На Рис. 3.3.2 представлены Вт-А характеристики лазеров обоих типов при настройке АОПФ на длину волны 1060 нм. Отметим, что схема 2-го типа дает 2.5-кратный выигрыш по внешней эффективности.



Рис. 3.3.2 Вт-А характеристики лазеров обоих типов.

Перестроечные кривые лазеров в режиме АКМ при различных уровнях выходной мощности изображены на Рис. 3.3.3. Ток инжекции был ограничен величиной 200 мА, при которой ПОУ-модуль прошел ресурсные испытания. Как и следовало ожидать, с уменьшением выходной мощности диапазон спектральной перестройки увеличивается.



Рис. 3.3.3 Перестроечные кривые лазеров типа 1 (а) и типа 2 (б) в режиме АКМ при различных уровнях выходной мощности.
На Рис. 3.3.4 представлены типичные спектры выходного излучения лазеров. У лазеров 1-го типа относительный уровень фона не превышал -55 дБ и был ниже чувствительности использованного спектрометра ADVANTEST-Q8347.



Рис. 3.3.4 Типичные спектры выходного излучения лазеров типа 1 (а) и типа 2 (б).

У лазеров 2-го типа величина SMS изменялась в пределах 30-50 дБ при спектральной перестройке и изменении уровня выходной мощности (Рис. 3.3.5). Контроллер ПОУ и АОПФ обеспечивал ручную перестройку с точностью 0.05 нм или свипирование длины волны по линейном закону в заданном диапазоне со скорость до 10⁴ нм/сек. При этом мгновенная ширина линии не превышала 0.1 нм. Проведенные исследования позволили значительно усовершенствовать ранее выпускавшуюся модель перестраиваемого лазера BroadSweeper-1060, в котором были использованы менее эффективный ПОУ и линейная схема внешнего резонатора.



Рис. 3.3.5 Зависимость величины SMS от длины волны лазера типа 2.

Заключение

Проведённые исследования легли в основу разработки и внедрения в производство новой серии приборов BroadSweeper-1060, превосходящих старую модель по полосе спектральной перестройки и по выходной мощности.

Приложение

П.1 Спецификации на приборы, разработанные в рамках данной диссертационной работы.

Спецификации широкополосных СЛД с колоколообразной формой спектра (SLD-34-MP, SLD-34-MP):



Example: SLD-341-HP2-DBUT-SM-PD-840

A maximum feedback of 10⁻³ is allowed to run HP series SLDs safely at full power.

SLD-34-MP: Superluminescent diodes at 840 - 860 nm with broad bell-shaped spectrum

Features:

- very wide bell-shaped optical spectrum
- no sidelobes in the coherence function
- negligible residual Fabry-Perot modulation depth
- internal PD monitor
 FC/APC terminated pigtails
- Packages:
 - fiber coupled Butterfly, DIL
 - free space TOW

Additional and customized:

PM pigtails (slow axis alignment; 45 degree orientation upon request)

Specifications (no	minal emitter stab	ilization tem	perature	+25°C)	
Parameter		Category	Min	Тур.	Max
Output power, SM fiber pigtail,		MP1	0.8	1.0	-
SLD-341, mW		MP2	1.5	2.0	
Output power, Glass window, SLD-340, mW		MP1	2.0	2.5	
		MP2	3.0	4.0	-
Forward current, mA		MP1	-	170	200
		MP2		180	220
Forward voltage, V		All	× .	×	2.8
Central	SLD-34 at 840	All	830	840	850
wavelength, nm	SLD-34 at 860	All	850	860	870
Chootrum width	10/LIN	MP1	55	60	-
Spectrum width, FWHM, nm		MP2	45	50	-
Residual spectral modulation depth, %		MP1	-	-	1.0
		MP2	-	-	2.0
Secondary coherence subpeaks (Reflectivity), dB (10 log)		All	•	-25	-
Slow / fast polarization ratio (PM modules)*, dB		All	-	7.0	2
Operating temperature, °C		All	-55	÷	+80
Cooler current, A		All	-	-	1.2
Cooler voltage, V		All	-	-	3.5

Applications:

- high resolution OCT
- fiber sensors
- Bragg grating sensors
- optical measurements

PERFORMANCE EXAMPLES



Coherence function, short displacement



* Pseudo-depolarized versions (light is launched into the fiber with its polarization oriented at 45° to the birefringent axes) are available upon request

The following part numbers should be used when ordering:

SLD-34(a)-(b)-(c)-(d)-(e)-(f),

where: (a) – 0 (free space) or 1 (fiber pigtailed),

(b) – power category (MP1, MP2), (c) – package type,

(d) - SM (isotropic) or PM (polarization maintaining) fiber (pigtailed

versions only),

(e) - PD (if PD monitor is required), (f) - central wavelength.

Example: SLD-341-MP1-DBUT-SM-PD-840.



Mirror displacement = Optical path difference /2

All specifications are subject to change without notice.

Спецификация СЛД с центральной длиной волны 840 нм и выходной непрерывной мощностью до 100 мВт (SLD-340-UHP):

SLD-340-UHP-TO9-PD: Ultra high power TO-9 packaged free-space SLD at 840 nm.

Features:

- CW output power of up to 100 mW
- Spatial brightness comparable to that of high-power single mode laser diodes
- Wide spectrum (comparable to that of LEDs) with very small residual Fabry-Perot modulation depth

Applications:

- optical illumination
- optical sensors
- optical measurements
- others



TO9 Package

Free-space SLD modules in temperature stabilized packages with internal TEC and thermistor for SLD temperature stabilization are available upon request.

Specifications (at +25 °C):

Parameter	Min	Тур.	Max
Output power (in a cone N.A.=0.71), mW			100
Forward current, mA			450
Forward voltage, V			3.0
Peak wavelength at +25 °C, nm	830	840	850
Wavelength shift with temperature (around +25 °C), dλ/dT, nm/°C		0.25	
Spectrum width*, nm	20	25-30	
Residual spectral modulation depth*, %		3.0	5.0
Secondary coherence subpeaks* (10 log), dB		-20	
Polarization ratio, dB		5-10	
PD monitor photocurrent*, µA	300		
Output power variation with temperature (around +25 °C), dP/dT, at a constant forward current*, mW/°C		-0.7	
Operating temperature**, °C	-20		+50
Storage temperature, °C	-55		+85

* At an output power of 100 mW.

** At +50 °C, the maximum output power is limited to 50 mW.

The following part numbers should be used when ordering:

SLD-340-UHP-TO9-PD.

A maximum optical feedback of 10⁻³ is allowed to run HP series SLDs safely at full power

All specifications are subject to change without notice.

PERFORMANCE EXAMPLES

Light-current curves at different case temperatures







Far field



Mean wavelength vs. case temperature



Спецификация комбинированного источника излучения с колоколообразной формой спектра (BroadLighter D-860-G):

D-860-G: Light source at 860 nm with broad bell-shaped spectrum

Applications:

- Optical coherence tomography
- Optical metrology
- **Optical measurements**

Features:

- Wide bell-shaped optical spectrum of up to 80 nm FWHM
- Coherence length* of less than 5 µm (in air)
- High output power
- Low Relative Intensity Noise (RIN)

* Coherence length is determined as full width at half maximum of the coherence function plotted versus mirror displacement.

Specifications:

D-860-G-HP-I - optically isolated model. D-860-G-HP1, D-860-G-HP2 - models without optical isolator for applications with optical feedback of less than -30 dB.

Parameter	Model	Min	Тур	Max
SM-fiber output power, mW	D-860-G-HP1	5.0	7.0	-
	D-860-G-HP2	15.0	20.0	-
	D-860-G-HP-I	10	12	-
Mean wavelength, nm	All	850	860	870
3-dB (FWHM) spectrum width, nm	D-860-G-HP1	70	80	19
	D-860-G-HP2	60	70	
	D-860-G-HP-I	60	70	-
Residual spectral modulation depth (0.05 nm resolution), %	All	-	2	5
Long-term stability, %**	All	±0.5		
Short-term stability, %***	All	±0.1		

Measurements taken every minute for 8 hours with 100 ms integration time.

*** Measurements taken every second for 15 minutes with 100 ms integration time

All measurements were taken after a one-hour warm-up period at an ambient temperature of 22 ± 0.5 °C.

Power requirements: 110 V AC or 220 V AC, 50/60 Hz Operating temperature range: 0 °C to +40 °C **Output: FC/APC**

Fiber: Corning Pure Mode HI 780

A maximum optical feedback of -30 dB (10⁻³) is allowed to run the models without optical isolator (D-860-G-HP1 and D-860-G-HP2) safely at full power.

All specifications are subject to change without notice.

PERFORMANCE EXAMPLES







Mirror displacement, mm





Спецификация двухканального комбинированного источника излучения повышенной широкополосности нечувствительного к оптической обратной связи (BroadLighter D-880-MP):

D-880-MP: 200 nm FWHM Light Source at 880 nm

Applications:

- Optical coherence tomography
- Optical metrology
- Optical measurements

Features:

- Wide optical spectrum: 200-nm FWHM
- Coherence length* of less than 2.5 µm (in air)
- Low feedback sensitivity
- Low Relative Intensity Noise (RIN)

* Coherence length is determined as full width at half maximum of the coherence function plotted versus mirror displacement.

Specifications:

Parameter	Min	Тур	Max
SM-fiber output power, mW	1.0	1.5	-
Mean wavelength, nm	870	. .	890
Bandwidth (FWHM), nm	190	200	-
Residual spectral modulation depth (0.05 nm resolution), %		0.5	2
Spectral flatness, %	-	-	45
Long-term stability, %**		±0.5	
Short-term stability, %*** ±0.1			

 ** Measurements taken every minute for 8 hours with 100 ms integration time.
 *** Measurements taken every second for 15 minutes with 100 ms

*** Measurements taken every second for 15 minutes with 100 ms integration time.

All measurements were taken after a one-hour warm-up period at an ambient temperature of 22 \pm 0.5 °C.

Power requirements: 110 V AC or 220 V AC, 50/60 Hz

Operating temperature range: 0 °C to +40 °C

Optical output: FC/APC

Fiber: Corning HI 780

A maximum feedback of -14 dB (4%) is allowed to run Broadlighter D-880-MP safely at full power.







Mirror displacement = Optical path difference / 2. Spatial resolution of measurements is 0.5 µm.

All specifications are subject to change without notice.

Спецификация широкополосного ПОУ-модуля с центральной длиной волны спектра усиления 1060 нм (SOA-542):

SOA-542: Travelling-wave broadband SOA at 1060 nm

Features:

- fiber-to-fiber optical gain of up to 25 dB
- output power of up to 13 dBm
- -3 dB optical gain bandwidth of up to 75 nm

Package: Butterfly (DBUT)

Additional & customized:

- PM fiber pigtails
- FC/APC terminated pigtails

Specifications

(nominal stabilization temperature +25 °C)

Parameter	Min.	Typ.	Max.
Forward current, mA		-	220
Forward voltage, V		0.00	2.5
Output optical power, dBm	-	-	13.0
Central wavelength λ_c , nm	-	1060	-
-3 dB optical gain bandwidth, nm	-	75	
Gain ripple, dB		< 0.1	-
Small signal gain, dB	-	-	25
Polarization dependent gain, dB		7.0	-







The following part numbers should be used when ordering:

SOA-542-(a)-(b), where: a – package type (DBUT), b – fiber type (SM or PM).

Example: SOA-542-DBUT-SM.





All specifications are subject to change without notice.

Спецификации перестраиваемых лазеров серии BroadSweeper-1060:

Bench Series Tunable Semiconductor Light Sources Technical Product Specification

To best match your practical needs, a number of the technical characteristics of the product (e.g. the output power level, target wavelengths for the full tuning range, the sweep speed limits etc.) can be customized.



Fig.1. Laser Cavity Schematic for the Standard Version of the Broadsweeper (Simplified)



Fig. 2. Signal-to-ASE Ratio for the Optical Output before the Filter*

* ANY EXAMPLES CONTAINED HEREIN ARE PROVIDED "AS IS" AND ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE.

Broadsweeper BS-1060-1

Technical Specification¹:

Laser Cavity Type	Fiber ring cavity with the blocked ASE-pedestal		
Laser Cavity Type	output		
Intracavity Spectrally Tunable	Ultra narrow bandpass quasi-collinear AOTF		
Element	(FWHM = 0.37 nm(@ 1060 nm)		
Full Wavelength Tuning Range	70 nm (1020 ± 2 nm to 1090 ± 2 nm)		
Minimum Wavelength Tuning	5 nm		
Range ²	01111		
Wavelength Adjustment Step	0.05 nm		
Output Wavelength Repeatability	±10 pm		
Sweep Speed Adjustment Step	10 nm/s @ 10-10000 nm/s / 1 nm/s @ 2-10 nm/s		
Output Power,	1 mW / 3 mW		
Low Power Mode/High Power Mode			
Optical Power Flatness vs.			
Wavelength	1.2 dB (max.)		
for the full wavelength tuning range			
Ouput Power Stability ³	< 0.5%		
Sweep Speed Range	2 nm/s to 10000 nm/s		
Spectral Linewidth,	<0.07 nm / <0.09 nm		
Low Power Mode/High Power Mode			
Signal to ASE Ratio	50 dB		
Polarization Extinction Ratio	18 dB (typ.)		
Optical Fiber Type	Corning PANDA PM 980		
Polarization Orientation in the	Slow axis (aligned with the connector key)		
Output Fiber			
Output Optical Connector	FC/APC type with the narrow key (2.0 mm)		
Operating Modes	Manual, Automatic, External, Modulation		
2-Wavelength Switching Frequency	0.1/0.2/0.5/1/2/5/10/20/50/100/200/500/1000 Hz		
I/O Interface⁴	RS-232		
Operating Temperature Range	+15 °C to + 30 °C		
Storage Temperature Range	0 °C to +40 °C		
Power Requirements⁵	110 VAC or 220 VAC, 50 Hz or 60 Hz		
Power Consumption	20 W		
Warm-up Time	10 min		
Continuous Operation ⁶	16 hrs/day		
Outline Dimensions (W × H × D)	257 × 170 × 325 mm		
Approximate Weight	9 kg		
Ontions	PM/SM patch cables of different lengths, optical		
optiona	power booster		
Warranty	12 months		

¹ ALL SPECIFICATIONS ARE QUOTED AFTER 1HR WARM-UP PERIOD AT A ROOM TEMPERATURE OF 22 ± 2 °C. ² SELECTABLE BY THE USER WITHIN THE FULL TUNING WAVELENGHT RANGE. ³ DURING 3 HOURS. ⁴ MALE CONNECTOR WITH DTE PIN FUNCTIONS. ⁵ YOUR LOCAL OPERATING VOLTAGE SHOULD BE SPECIFIED WHEN PLACING THE ORDER. ⁶ FOR THE VERSIONS WITH THE PROLONGED OPERATIONAL TIME (UP TO ROUND-THE-CLOCK OPERATION), PLEASE CONTACT SUPERLUM BEFORE PLACING THE ORDER.

Part Number	Description
BS-785-1, BS-840-1, BS-930-1, BS-1060-1.	Tunable semiconductor light source with the standard spectral characteristics, output power of 1 mW / 3 mW (low power mode / high power mode) and a sweep speed range of 2-10000 nm/s.
BS-785-2, BS-840-2, BS-930-2, BS-1060-2.	Tunable semiconductor light source with the standard spectral characteristics, output power of 1 mW / 3 mW (low power mode / high power mode) and a sweep speed range of 100-100000 nm/s.
BS-785-1-HP, BS-840-1-HP, BS-930-1-HP, BS-1060-1-HP.	Tunable semiconductor light source with the standard spectral characteristics, output power of 1 mW / 3 mW (low power mode / high power mode) and a sweep speed range of 2-10000 nm/s. An internal optical power booster with the output power of 20 mW is included.
BS-785-2-HP, BS-840-2-HP, BS-930-2-HP, BS-1060-2-HP.	Tunable semiconductor light source with the standard spectral characteristics, output power of 1 mW / 3 mW (low power mode / high power mode) and a sweep speed range of 100-100000 nm/s. An internal optical power booster with the output power of 20 mW is included

П.2 СЛД – модули с центральной длиной волны 1300 нм, работоспособные при температуре окружающей среды от –55 °С до +125 °С.

Для практических применений некоторых (например, ДЛЯ волоконнооптических гироскопов) востребованы СЛД-модули с выводом излучения через OBC, обладающие широким диапазоном рабочих температур. Насколько нам известно, коммерчески доступные образцы обладают предельной рабочей температурой 85°С. Для поддержания постоянной мощности и спектральных характеристик при температуре окружающей среды от -55 °C до +125°C потребовалась разработка охлаждаемого модуля специальной конструкции.

Для этого использовались недавно разработанные СЛД спектрального диапазона 1300 нм [117], которые позволили получить достаточную оптическую 1 мВт наименьшей потребляемой мощность около при мощности И. соответственно, наименьшем тепловыделении. Такая оптическая мощность была получена при токах меньше 100 мА и потребляемой мощности не больше 0.2 Вт. Образцы СЛД имели традиционную конструкцию. Ось гребневидного волновода длиной 1000 мкм и шириной 4 мкм имела наклон 12° по отношению к нормали к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены антиотражающие покрытия. Типичный спектр и Вольт-Амперная характеристика такого СЛД представлены на Рис. П.2.1.



Рис. П.2.1 Типичная Вольт-Амперная характеристика (а) и спектр излучения (б) использованного СЛД.

Для температур выше 85°С нельзя использовать традиционный ОВС Corning SMF-28 и защитную трубку (при таких температурах произойдёт оплавление всей органики). Поэтому защитную трубку убрали полностью, а OBC заменили на Corning SM-MT. По оптическим характеристикам это оптическое волокно соответствует традиционному, но оболочка подходит для агрессивной окружающей среды, включая высокие температуры. Также использовался специальный припой. Следующим этапом был подбор холодильника, который бы обеспечил требуемую разницу температур между основаниями. Для наших целей был выбран двухсекционный ТЭМО производства компании «RMT» (модель: 2MC04-063-05AN). Фотография этого ТЭМО представлена на Рис. П.2.2. Сборка модуля производилась в стандартном корпусе Butterfly.



Рис. П.2.2 двухсекционный ТЭМО.

Для проверки работоспособности конструкции была собрана установка (схема показана на Рис. П.2.3): СЛД - модуль размещался на достаточно большом радиаторе, для лучшей теплопроводности использовалась термопаста, далее вся конструкция размещалась в камере TERCHY UC-20CE, способной поддерживать заданную температуру в диапазоне -60 °C - +150 °C. С помощью специального шлейфа модуль подключался к расположенному вне камеры электронному драйверу ILX LDC-3900, который обеспечивал рабочие токи СЛД и ТЭМО и позволял контролировать температуру внутри модуля и напряжение ТЭМО. Для контроля выходной оптической мощности OBC также выводился из камеры.

На Рис. П.2.4 представлены кривые выхода ТЭМО на режим термостабилизации при температуре в камере –55 °C и +125 °C. Время выхода на режим составило около 10 секунд в первом случае и около 30 секунд во втором.



Рис. П.2.3 Схема тестирования СЛД – модуля при разных температурах окружающей среды.

Рис. П.2.5 демонстрирует зависимость потребляемой ТЭМО мощности от температуры в камере при различных температурах стабилизации. Видно, что стабилизация на уровне 25 °C при высоких температурах окружающей среды требует гораздо больше мощности, чем на уровне 35 °C. При этом стабилизация на это уровне не сильно поднимет ток, нужный СЛД для получения 1 мВт выходной мощности, спектральные же характеристики при этом практически не изменяются. Поэтому в дальнейшем, было решено термостабилизировать модули на уровне 35 °C.



Рис. П.2.4 Выход ТЭМО на режим термостабилизации на уровне 25 °C (1), 30 °C (2), 35 °C (3) при температуре в камере -55 °C (а) и +125 °C (б).



Рис. П.2.5 Зависимость мощности, потребляемой ТЭМО, от температуры в камере при различных температурах стабилизации.

Для партии из семи модулей были проведены тесты стабильности выходной оптической мощности при температурах окружающей среды –55 °C и +125 °C. На Рис. П.2.5 представлены хронограммы этих испытаний. Продемонстрированная стабильность приемлема для большинства практических применений.



Рис. П.2.5 Хронограммы тестов стабильности выходной мощности при температуре окружающей среды –55 °С (а) и +125 °С (б).

Заключение

Основные результаты данной диссертационной работы можно свести к следующим положениям:

 Разработаны и исследованы СЛД с центральной длиной волны 660-680 нм и мощностью из ОВС более 10 мВт, обладающие сроком службы более 20000 часов.

Разработаны и исследованы СЛД на основе КРС диапазона 800 - 900 нм с колоколообразной формой спектра. В этих приборах толщина активных слоёв, длины активных каналов и рабочие режимы были выбраны таким образом, чтобы вклад в суперлюминесценцию давали квантовые переходы только из основной подзоны энергетического спектра. При этом с ростом тока инжекции ширина спектра сильно увеличивается в отличие от СЛД на основе «объёмных» ДГС, в которых ширина спектра слабо зависит от уровня накачки. Использование различных составов активных слоёв позволило разработать серию СЛД-модулей с различными центральными длинами волн в указанном спектральном диапазоне и выходными мощностями от единиц до десятков мВт. По ширине спектра эти приборы превосходят существующие аналоги (27-63 нм). Форма спектра излучения, близкая к гауссовой, позволяет получить АКФ с минимальными искажениями центрального пика, что, в свою очередь, улучшает соотношение сигнал-шум при применении этих СЛД в интерференционных системах.

 Разработаны и исследованы СЛД на основе ОКРС со сверхтонким активным слоем (6 нм), обладающие рекордно широким спектром порядка 100 нм при центральной длине волны около 830 нм.

 На основе разработанных СЛД создан новый комбинированный источник света – BroadLighter D-860-G. Спектр излучения прибора имеет колоколообразную форму с шириной до 100 нм при выходной оптической мощности 5-20 мВт из ОВС в зависимости от типа используемых СЛД.

• На основе новых и ранее разработанных СЛД создан новый комбинированный источник света – BroadLighter D-880-MP. Спектр излучения

прибора имеет рекордную ширину до 200 нм (длина когерентности – около 3,5 мкм), выходная мощность составляет ~1,5 мВт из ОВС. Прибор отличается крайне низкой восприимчивостью к оптической обратной связи.

 Разработаны и исследованы четыре типа пространственноодномодовых СЛД с центральными длинами волн 790 нм, 840 нм, 960 нм и 1060нм с непрерывной выходной оптической мощностью до 100 мВт. Оценочное время жизни светоизлучающих модулей на основе этих СЛД составило более 10000 часов.

 Разработана новая модель ПОУ-модуля бегущей волны на основе ДКРС с «активными» слоями (InGa)As с полосой оптического усиления шириной порядка 100 нм, с центральной длиной волны 1060 нм и «чистым» коэффициентом усиления около 25 дБ.

 Использование вышеуказанного ПОУ-модуля и кольцевой схемы внешнего резонатора позволило радикально усовершенствовать ранее выпускавшуюся модель перестраиваемого лазера BroadSweeper-1060, в котором были использованы менее эффективный ПОУ и линейная схема внешнего резонатора. Диапазон спектральной перестройки и выходная оптическая мощность увеличены в 1,5 (до 100 нм) и 4 (до 20 мВт) раза соответственно.

Большинство вышеперечисленных результатов работы ИЗ уже на сегодняшний день нашло своё практическое применение и внедрено в 000 производство. Так. компанией «Суперлюминесцентные Диоды» коммерчески реализованы новые модели перспективных с практической точки зрения светоизлучающих модулей SLD-261-HP2, SLD-340-UHP и серия приборов SLD-34, включающая в себя 24 модели, отличающиеся по конструкции и выходным характеристикам. Коммерчески реализованы новые комбинированные источники света BroadLighter D-860-G и BroadLighter D-880-MP. Реализован новый полупроводниковый оптический усилитель SOA-542 и на его основе усовершенствован быстроперестраиваемый лазер BroadSweeper-1060.

Благодарности.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю С.Д. Якубовичу за предложенную тему диссертации, оказанное внимание и неоценимую помощь на всех этапах выполнения диссертации; А.Т. Семенову за инициацию ряда исследований и внимание к ним; А.А. Мармалюку с сотрудниками за проведение экспериментальных ростовых процессов ГЭС; А.В. Лобинцову с сотрудниками за проведение постростовых технологических процессов; А.А. Бахареву с сотрудниками за сборку образцов СЛД и ПОУ-модулей; Д.Р. Шидловскому с сотрудниками за изготовление оптомеханических узлов и электронных плат для новых приборов серии BroadLighter И BroadSweeper; сотрудникам лаборатории Е.В. Андреевой, П.И. Лапину, Ю.О. Костину, А.А. Лобинцову и М.В. Шраменко за помощь в измерениях и расчетах.

Сокращения и условные обозначения

АКМ - автоматический контроль мощности

АКТ - автоматический контроль тока

АКФ - автокорреляционная функция

АОП - антиотражающие покрытие

АОПФ – акустооптический перестраиваемый фильтр

ВОСПИ - Волоконно-оптическая система передачи информации

ГЭС - гетероэпитаксиальная структура

ДГС - Двухсторонняя гетероструктура

ДКРС - двухслойная квантоворазмерная структура

ИК - инфракрасный

КОД - катастрофическая оптическая деградация

КРС - квантоворазмерная структура

КЯ, КН, КТ - Квантовые ямы (нити, точки)

ЛД - Лазерный диод

МКРС - многослойная квантоворазмерная структура

МОС-гидридная эпитаксия – газотранспортная эпитаксия из

металло - органических соединений

МПЭ - Молекулярно пучковая эпитаксия

ОВС - одномодовый волоконный световод

ОКРС - однослойная квантоворазмерная структура

ОКТ - оптическая когерентная томография

ПЛ - Полупроводниковый лазер

ПОУ - Полупроводниковый оптический усилитель

РО ДГС - Двухсторонняя гетероструктура с раздельным ограничением

СЛД - суперлюминесцентный диод

ТЭМО – термоэлектрический микроохладитель

BroadLighter - серия комбинированных источников света

BroadSweeper - серия перестраиваемых лазеров

FWHM (full width at half maximum) - ширина кривой на половине высоты

in vivo - на живом организме, объекте

MOPA - master oscillator power amplifier

MTTF - median time to failure – средняя наработка до отказа

RIN - relative intensity noise (относительные шумы интенсивности)

Ripple - паразитные модуляции модами Фабри-Перо

SMS - Side mode suppression (превышение полезного сигнала над фоном)

VCSEL - ПЛ с вертикальным резонатором

Обозначения переменных.

E_l(k) - энергии l-й подзоны в зоне проводимости

E_m(k) – энергии т–й подзоны в валентной зоне

 $f_c f_v - функции распределения Ферми в зоне проводимости и валентной зоне$

 $|M_{lm}(k)|^2$ - квадрат матричного элемента

 ψ_l, ψ_m огибающие волновых функций

с – скорость света

β- доля спонтанно испускаемых фотонов, дающих вклад в моды волновода.

- $\phi(v)$ спектральная плотность
- d_a- толщина активного слоя
- g усиление основной моды
- G интегральное усиление
- h постоянная Планка
- с_g групповая скорость света

R_{sp} – спектральная плотность скорости спонтанного излучения:

- I₀ ток накачки СЛД, при котором интенсивности пиков спектра равны
- I_{SLD} ток накачки СЛД
- J плотность тока накачки
- L_a длина активного канала
- W ширина активного канала
- L_C длина когерентности

 P_{FS} – оптическая мощность излучения в открытое пространство

Р_{SM} – мощность излучения из ОВС

R_{back} – коэффициент отражения от входной грани диода

 R_{out} – коэффициент отражения от выходной грани диода

rip – глубина модуляции спектра, риппл

t – время, продолжительность теста

Т₁, Т₂ – рабочие температуры прибора

α - нерезонансные оптические потери основной моды

- $S_{sp}(\lambda)$ спектр спонтанного излучения
- $S(\lambda)$ спектр излучения
- $g(\lambda)$ спектр усиления

k – постоянная Больцмана

Г- фактор оптического ограничения

- $\Delta\lambda-$ ширина на половине высоты спектра излучения
- $\lambda\left(\lambda_{c}\right)-$ центральная длина волны спектра
- λ_m медианная длина волны

ων – частота излучения

τ – срок службы

 $(\Delta P)^2$ – среднее квадратичное отклонение интенсивности спектральной плотности оптического сигнала

 $P_{0\,-}$ средняя оптическая мощность

 $K_{\rm s}$ - доля выходной мощности, сосредоточенная в центральном пике

Литература

[1] Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М. "Квантовомеханические полупроводниковые генераторы и усилители электромагнитных колебаний," ЖЭТФ, **37**, 2, 587 (1959).

[2] Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М. "Получение состояний с отрицательной температурой в p-n переходах вырожденных полупроводников," ЖЭТФ, **40**, 6, 1879 (1961).

[3] Hall R.N., Fenner G.E., Kingsley I.P., Soltus T.I., Carlson R.K. "Coherent light emission from GaAs junctions," Phys. Rev. Lett., **9**, 9, 366 (1962).

[4] Nathan M.I., Dumke W.P., Burns G., Dill F.N., Lasher G. "Stimulated emission of Radiation from GaAs p-n junctions," Appl. Phys. Lett., **1**, 2, 62 (1962).

[5] Quist T.M., Rediker R.H., Keyes R.J., Krag W.E., Lax B., Mc Whorter A.L. "Semiconductor maser on GaAs" Appl. Phys. Lett., **1**, 4, 91 (1962).

[6] Багаев В.С., Басов Н.Г., Вул Б.М., Копыловский Б.Д., Крохин О.Н., Маркин Е.П., Попов Ю.М., Хвощев А.Н., Шотов А.П. "Полупроводниковый квантовый генератор на p-n переходе в GaAs," ДАН СССР, **150**, 2, 275 (1963).

[7] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.М., Портной Е.Л., Третьяков Д.Н. "Когерентное излучение в эпитаксиальных структурах с гетеропереходами в системе AlAs-GaAs," ФТП, **2**, 10, 1545 (1968).

[8] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Гарбузов Д.З., Портной Е.Л., Жиляев Ю.В., Морозов Е.П., Трофим В.Г. "Исследование влияния параметров гетероструктуры на пороговый ток лазеров и получение непрерывного режима генерации при комнатной температуре," ФТП, **4**, 1826 (1970).

[9] Hayashi I., Panish M.B., Foy P.W. "A low threshold room-temperature injection laser," IEEE J. Quantum. Electron., **5**, 4, 211 (1969).

[10] Hayashi I., Panish M.B., Foy P.W, Sumski S. "Junction lasers which operate

continuously at room temperature," Appl. Phys. Lett., 17, 109 (1970).

[11] Под ред. Т.Тамира. "Волноводная оптоэлектроника," М.: Мир, с. 338 (1991).

[12] Богданкевич О.В., Дарзнек С.А., Елисеев П.Г. "Полупроводниковые лазеры," М.: Наука, с. 415 (1976).

[13] Ривлин Л.А. "Динамика излучения полупроводниковых квантовых генераторов," М.: Сов. радио (1976).

[14] Алферов Ж.И. "Полупроводниковые гетероструктуры (Обзор)," ФТП,11, 2072 (1977).

[15] Елисеев П.Г. "Проблема надежности и физика деградационных процессов в полупроводниковых лазерах," В сб.: Итоги науки и техники, сер. Радиофизика, М.: ВИНИТИ, **14**, 2, 5 (1978).

[16] Кейси Х., Паниш М. "Лазеры на гетероструктурах," М.: Мир., 1; 2 (1981).

[17] Елисеев П.Г. "Введение в физику инжекционных лазеров," М.: Наука, (1983).

[18] A.Y. Cho. J. "Film Deposition by Molecular-Beam Techniques," Vac. Sci. Technol., 8, 31 (1971).

[19] A.Y. Cho. "Growth of Periodic Structures by the Molecular-Beam Method," Appl. Phys. Lett., **19**, 467 (1971).

[20] H.M. Manasevit. "Single crystal GaAs on insulating substrates," Appl. Phys. Lett., **12**, 156 (1968).

[21] R. Dingle, W. Wiegmann, C.H. Henry. "Quantum states of confined carriers in very thin Al_xGa_{1-x}As-GaAs-Al_xGa_{1-x}As heterostructures," Phys. Rev. Lett., **33**, 827 (1974). [22] S. Simhony, E. Kapon, T. Colas, D.M. Hwang, N.G. Stoel, P. Worland. "Vertically stacked multiple-quantum-wire semiconductor diode lasers," Appl. Phys. Lett., **59**, 2225 (1991).

[23] А.И. Екимов, А.А. Анущенко. "Quantum size effect in three-dimensional microscopic semiconductor crystals," Письма ЖЭТФ, **34**, 363 (1981).

[24] А.Л. Эфрос. ФТП, 16, 1209 (1982).

[25] L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, M.N. Charasse, G.Le. Roux. "Growth by molecular beam epitaxy and characterization of InAs/GaAs strained layer superlattices," Appl. Phys. Lett., **47**, 1099 (1985).

[26] Growe J.W., Ahearn W.E. "Semiconductor laser amplifiers," IEEE J., QE-2, 8, 283 (1966).

[27] Ривлин Л. А., Семенов А.Т., Якубович С. Д., "Динамика и спектры излучения полупроводниковых лазеров," Радио и связь, М., (1983).

[28] Connelly M. J., "Semiconductor optical amplifiers," Kluwer Acad. Publ., Dordrecht (2002).

[29] Анненков Д.М., Богатов А.П., Елисеев П.Г., Охотников О.Г., Пак Г.Т., Рахвальский М.П., Федоров Ю.Ф., Хайретдинов К.А., "Спектральносогласованная модуляция излучения инжекционного лазера в усилителе бегущей волны с частотой до 2 ГГц," Квантовая электроника, **11**, 231, (1984)

[30] Богатов А.П., Дьячков Н.В., Дракин А.Е., Гущик Т.И., "Амплитуднофазовая модуляция излучения усилителя бегущей волны на основе лазерного диода," Квантовая электроника, **43**, 699 (2013)

[31] Buus J., Amann M. C., Blumental D. "Tunable laser diodes and related optical sources," Wiley, Hoboken, (2005).

[32] Helstein M. M., Mehuys B., Yariv A., "Broadband tunability of gain flattened quantum well semiconductor lasers with an external grating," Appl. Phys., 54, 11, 1092 (1989).

[33] Дураев В. П., Медведев С. В., "Полупроводниковые оптические усилители в диапазоне длин волн 840-1550 нм," "Научное приборостроение," **22**, 3, 53 (2012).

[34] M. E. Brezinski, G. J. Tearney, S. A. Boppart, E. A. Swanson, J. F. Southern, and J. G. Fujimoto, "Optical biopsy with optical coherence tomography, feasibility for surgical diagnostics," Journal of Surgical Research, 71 (1997).

[35] S.A. Boppart, M.E. Brezinski, B.E. Bouma, G.J. Tearney, J.G. Fujimoto. "Investigation of developing embryonic morphology using optical coherence tomography," Dev. Biol. **177**, 54 (1996).

[36] S. A. Boppart, B. E. Bouma, C. Pitris, G. J. Tearney, J. F. Southern, M. E. Brezinski, and J. G. Fujimoto, "Intraoperative assessment of microsurgery with three-dimensional optical coherence tomography," Radiology, 208 (1998).

[37] Курбатов Л.Н., Шахиджанов С.С., Быстрова Л.В., Демидов Ю.П., Катаев А.Г., Киселев А.А. "Исследование многолучевого инжекционного лазерного усилителя из арсенида галлия," Радиотехника и электроника, **16**, 4 (1971).

[38] Ступников В.Н., Якубович С.Д. "Влияние конфигурации инжекционного излучателя на характеристики излучения," сб. Электронная техника, **11**, 5, 62 (1978).

[39] "Fiber Optics and Laser Sensors XI," Proc. SPIE, 2070 (1993).

[40] Frieble E.J., Kersey A.D. "Fiberoptics sensors measure up for smart structures," Laser Focus World, **30**, 5, 165 (1994).

[41] "Time Resolved Imaging in Medicine," Optics & Photonics News, 4, 10 (1993).

[42] Г.Г. Унгер "Оптическая связь", М.: Связь (1979).

[43] S. Kondo, H. Yasaka, Y. Noguchi, K. Magari, S. Sugo and O. Mikami "Very Wide Spectrum Multiquantum Well Superluminescent Diode at 1.5 W," Electronics Letters, 28, 2, 132 (1992).

[44] H. Kobayashi, H. Iwamura, T. Saku, K. Otsuka "Polarization-dependent qain- current relationship in GaAs-AlGaAs MQW Laser diodes," Electron. Lett., 19, 5, 166 (1983).

[45] Luttinger J.M., Kohn W., "Motion of Electrons and Holes in Perturbed Periodic Fields," Phys. Rev., 97, 869 (1955).

[46] В. К. Батоврин, И. А. Гармаш, В. М. Геликонов, Г. В. Геликонов, А. В. Любарский, А. Г. Плявенек, С. А. Сафин, А. Т. Семенов, В. Р. Шидловский, М. В. Шраменко, С. Д. Якубович, "Суперлюминесцентные диоды на основе однослойных квантоворазмерных (GaAl)As-гетероструктур," Квантовая Электроника, 23, 2, 113 (1996).

[47] C. Chudoba, J.G. Fujimoto, E.P. Ippen, H.A. Haus, U. Morgner, F.X. Kärtner, V. Scheuer, G. Angelow, T. Tschudi, "All-solid-state Cr:forsterite laser generating 14-fs pulses at 1.3 μm," Opt. Lett. **26**, 292, (2001).

[48] Y. Wang, J.S. Nelsen, Z. Chen, B.J. Reiser, R.S. Chuck, R.S. Windeler, "Optimal wavelength for ultrahigh-resolution optical coherence tomography," Opt. Express **11**, 12, 1411 (2003).

[49] S. Bourquin, A.D. Acquirre, I. Hartl, P. Hsiung, T.H. Ko, J.G. Fujimoto, T.A. Birks, W.J. Wadsworth, U. Bunting, D. Kopf, "Ultrahigh resolution real time OCT imaging using a compact femtosecond Nd:Glass laser and nonlinear fiber" Opt. Express **11**, 3290 (2003).

[50] B.E. Bouma, G.J. Tearney, I.P. Bilinsky, B. Golubovic, J.G. Fujimoto, "A Self-Phase-Modulated KerrLens-Modelocked Cr:forsterite Laser Source for Optical Coherence Tomography," Opt. Lett. **21**, 1839 (1996).

[51] Борн М., Вольф Э. "Основы оптики," М., Наука (1973).

[52] D.J. Gallant, M.L. Tilton, D.J. Bossert, J.D. Barrie, G.C. Dente, "Optimized single-layer antireflection coatings for semiconductor lasers," IEEE Photon, Technol. Lett. **9**, 3, 300 (1997).

[53] S.A. Safin, A.T. Semenov, V.R. Shidlovski et al., "High-power 0.82 mW superluminescent diodes with extremely low Fabry-Perot modulation depth," Electron. 1ett., 28, 6, 530 (1993).

[54] A.T. Semenov, V.R. Shidlovski, S.A. Safin, V.P. Konyaev, M.V. Zverkov, "Superluminescent diodes for visible (670 nm) spectral range based on AlGaInP/ GaInP heterostructures with tapered grounded absorber," Electron. Lett. **29**, 6, 530 (1993).

[55] Y. Kashima, M. Kobayashi, H. Takano, "High Output Power GaInAsP/InP superluminescent diode at 1.3 μm," Electron. Lett. **24**, 1507 (1988).

[56] H. Nagai, Y. Noguchi, S. Sudo, "High-power, high-efficiency 1.3 μm superluminescent diode with a buried bent absorbing guide structure," Appl. Phys. Lett. 54, 18, 1719 (1989).

[57] A.T. Semenov, V.R. Shidlovski, "Very high power, broad and flat spectrum superluminescent diodes and fiber modules for OCT applications," paper presented at BIOS 2000, Photonics West '99, San-Jose, CA, Paper 3915-43 (2000).

[58] "Reliability assurance for optoelectronic devices" Telcordia Generic Requirements GR-468-CORE, **2** (2004).

[59] M. Vanzi, A. Bonfiglio, F. Magistrali, G. Salmini, "Electron microscopy of life tested semiconductor laser diodes," Micron. **31**, 259 (2000).

[60] C.H. Henry, P.M. Petroff, R.A. Logan, F.R. Merritt, "Catastrophic damage of Al_xGa_{1-x}As double-heterostructure laser material," J. Appl. Phys. **50**, 3721 (1979).

[61] G. Chen, C.L. Tien, "Facet heating of quantum well lasers," J. Appl. Phys. 74, 2167 (1993).

[62] D. Chao, J.Ma, X.Li "Research on the reliability of SLD through accelerated life testing," Proc. of ICRMS, 1263 (2009).

[63] L.Wang, X. Li, T. Jiang, B.Wan "SLD constant stress ADT data analysis based on time series method," Proc. of ICRMS, 1313 (2009).

[64] P.G. Eliseev "Optical strength of semiconductor laser materials" Prog. Quant. Electron., **20**, 1, 1-82 (1996).

[65] B. Bouma, G.J. Tearney, S.A. Boppart, M.R. Hee, M.E. Brezinski, J.G. Fujimoto, "High-resolution optical coherence tomographic imaging using a modelocked Ti:Al2O3 laser source," Opt. Lett. **20**, 13, 1486 (1995).

[66] A.T. Semenov, V.R. Shidlovski, "Very high power, broad and flat spectrum superluminescent diodes and fiber modules for OCT applications," paper presented at BIOS 2000, Photonics West'99, San-Jose, CA, Paper 3915-43 (2000).

[67] Feltin E., Castiglia A., Cosendey G., Sulmoni L., Carlin J.-F., Grandjean N., Rossetti M., Dorsaz J., Laino V., Duelk M., Velez C., "Broadband blue superluminescent light-emitting diodes based on GaN," Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), IPEQ, CH-1015 Lausanne, Switzerland, Appl. Phys. Lett., **95**, 8, (2009).

[68] M.E. Lipin, V.E. Rafailov, A.T. Semenov, V.R. Shidlovski "Very high power superluminescent diodes as alternative to fluorescent fiber-doped light sources," paper presented at Fiber Optic Sensors Conference, Photonics East'99, Boston, Paper 3860-67; Proc. SPIE 3860, 480 (1999).

[69] T. Tokayama, O. Imafuji, Y. Kouchi, M. Yuri, A. Yoshikawa, K. Itoh "100-mW high power angled-stripe superluminescent diodes with a new real refractiveindex-guided self-aligned structure," IEEE J. Quantum Electron. **QE-32**, 11, 1981 (1996). [70] P.A. Lobintsov, D.S. Mamedov, V.V. Prokhorov, A.T. Semenov, S.D. Yakubovich, "High-power superluminescent diodes with non-injection output sections," Quantum Electron. **34**, 3, 209 (2004).

[71] A.T. Semenov, V.K. Batovrin, I.A. Garmash, V.R. Shidlovski, M.V. Shramenko, S.D. Yakubovich "(GaAl)As SQW superluminescent diodes with extremely low coherence length," Electron. Lett. **31**, 4, 314 (1995).

[72] C.-F. Lin, B.-L. Lee, "Extremely broadband AlGaAs/GaAs superluminescent diodes," Appl. Phys. Lett. **71**, 12, 1598 (1997).

[73] Е.В. Андреева, Н.А. Волков, Ю.О. Костин, П.И. Лапин, А.А. Мармалюк, Д.Р. Сабитов, С.Д. Якубович, "Широкополосные суперлюминесцентные диоды ближнего ИК диапазона спектра на основе двуслойных квантоворазмерных гетероструктур," Квант. электроника, **38**, 8, 744 (2008).

[74] G. Alphonse, "Design of high-power superluminescent diodes with low spectral modulation," Proc. SPIE 4648, 125 (2002).

[75] P.I. Lapin, D.S. Mamedov, S.D. Yakubovich, M. Wojtkowski, J.G. Fujimoto, "Novel near-IR broad-band light sources for optical coherence tomography based on superluminescent diodes," Proc. SPIE-OSA 5861, 586108 (2005).

[76] Z.Z. Zhang, Z.G. Wang, B. Xu et al. "High performance quantum-dot superluminescent diodes," IEEE Photon. Technol. Lett. **16**, 1, 27 (2004).

[77] Лапин П.И., Мамедов Д.С., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Якубович С.Д. "Мощные и широкополосные суперлюминесцентные диоды спектрального диапазона 1000—1100 нм," Квантовая электроника, **36**, 4, 315 (2006).

[78] S.H. Cho, I.K. Han, Y. Hu, J.H. Song, P.J.S. Heim, M. Dagenais, F.G. Johnson, D.R. Stone, H.Shen, J. Pamulapati, W. Zhou ">90mW CW Superluminescent Output Power from Single-Angled Facet-Ridge Waveguide Diode at

1.5 mW," Proceedings on Advanced Semiconductor Lasers and Their Applications, 31, 5 (2000).

[79] D.S. Mamedov, V.V. Prohorov, S.D. Yakubovich "Broad-Band Superluminescent Diode Based on Multiquantum Well (InGa)PAs Heterostructure at 1550 nm," CLEO/Europe-EQEC 2003, Munich, Germany, CC-Semiconductor Lasers. Conference Technical Digest Paper CC7W (2003).

[80] T.-K. Ong, M. Yin, Z. Yu, Y.-C. Chang, Y.-L. Lam, "High performance quantum well intermixed superluminescent diodes," Meas. Sci. Technol. **15**, 8, 1591 (2004).

[81] J. Wang, L.T. Li, W. Xu, R. Yu, J. Ramalingam, Z. Wu, W. Zhu, and Xun Li "Ultrabroad-bandwidth and high-power superluminescent light-emitting diodes," Proc. SPIE 5690, 531 (2005).

[82] Kostin Yu.O., Lapin P.I., Shidlovsky V.R., Yakubovich S.D., "Towards 100nm Wide SLDs at 840 nm," Proc. of SPIE, **7139**, 713905 1-7 (2008).

[83] M.M. Helstein, B. Mehuys, A. Yariv, "Broadband tunability of gain-flattened quantum-well semiconductor lasers with an external grating," Appl. Phys., **54**, 11, 1092 (1989).

[84] Андреева Е.В., Магдич Л.Н., Мамедов Д.С., Руенков А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д., "Перестраиваемый полупроводниковый лазер с акустооптическим фильтров во внешнем оптоволоконном резонаторе," Квантовая электроника, **36**, 4, 324 (2006).

[85] S.E. Harris, S.T.K. Nieh, R.S. Feigelson, "CaMoO4 electronically tunable optical filters," Appl. Phys. Lett., **17**, 5, p. 223 (1970).

[86] Л.Н. Магдич, В.Я. Молчанов, "Акустооптические устройства и их применение," М., Сов. Радио (1978).

[87] Лобинцов А.А «Полупроводниковые оптические усилители бегущей волны ближнего ИК-диапазона спектра и приборы на их основе», Диссертация на соискание учёной степени КТН, ОАО НИИ «Полюс» (2013).

[88] W. Drexler, U. Morgner, R.K. Ghanta, F.X. Kärtner, J.S. Schuman, J.G. Fujimoto, "Ultrahigh-resolution ophthalmic optical coherence tomography," Nat. Med., 7, 502 (2001).

[89] K. Shibata, Y. Yoshida, M. Sasaki, K. Ono J.-I. Horic, T. Yagi, T. Nishimura, "Hight-power 660-nm laser diodes for recordable DL DVDs," Journ. of Sel. Topics in QE, **11**, 51, 1193 (2005).

[90] A. Padalitsa, A. Marmalyk, I. Yarotskaya, P. Gorlochuk, Y. Ryaboshtan, S. Ilchenk, A. Lobintsov, S. Yakubovich, "Heterostructures AlGaInP/GaInP grown by MOVPE for SLDs emitting at 670 nm," 17th Int. Conf. on MVPE, Web-Poster-0-71 (2014).

[91] W. Drexler, J.G.Fujimoto, "Optical coherence tomography," Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (2008).

[92] Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Якубович С.Д., "Суперлюминесцентные диоды «ближайшего» ИК диапазона с шириной спектра 100 нм," Квантовая электроника, **42**, 11, 961 (2012).

[93] Д.В.Батрак, С.А. Богатова, А.В.Бороденко, А.Е.Дракин, А.П.Богатов, "Моделирование материального усиления квантоворазмерных слоёв InGaAs, используемых в гетеролазерах, работающих в спектральной области 1,06мкм," Квантовая электроника, **35**, 4, 316 (2005).

[94] T.H. Ko, D.C. Adler, J.G. Fujimoto, D. Mamedov, V. Prokhorov, V. Shidlovski, and S. Yakubovich, "Ultrahigh resolution optical coherence tomography imaging with broadband superluminescent diode light source," Optics Express 12: 2112 (2004).

[95] Helstein M.M., Mehuys B., Yariv A. "Broadband tunability of gain flattened quantum well semiconductor lasers with an external grating," Appl. Phys., **54**, 1092 (1989).

[96] Ching-Fuh Lin, Bor-Lin Lee. "Extremely broadband AlGaAs/GaAs superluminescent diodes," Appl. Phys. Lett., **71**, 1598 (1997).

[97] Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д., "Сверхширокополосный мощный суперлюминесцентный диод с длиной волны излучения 920 нм," Квантовая электроника, 33, 6, 471 (2003).

[98] Лапин П.И., Мамедов Д.С., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Якубович С.Д., " Мощные и широкополосные суперлюминесцентные диоды спектрального диапазона 1000—1100 нм ," Квантовая электроника, **36**, 4, 315 (2006).

[99] Goldberg L., Mehuys D., "High power superluminescent diode source," Electron. Lett., **30**, 20, 1682 (1994).

[100] Takayama T., Imafuji O., Kouchi Y., Yuri M., Yoshikava A., Itoh K., "100-mW high-power angled-stripe superluminescent diodes with a new real refractiveindex-guided self-aligned structure," IEEE J. Quantum Electron., **32**, 11, 1981 (1996).

[101] Konoplev O.A., Park S., Saini S.S., Merrit S.A., Hu Y., Luciani V.,Heim P.J.S., Enk R., Bowler D., "Half-watt high-power single mode superluminescent LED at 1335 nm with single-facet electro-optical efficiency of 28%," Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., **5739**, 66 (2005).

[102] Sugo M., Yoshimura R., Shibata Y., "High-power (>80mW) and high efficiency (>30%) 1.3 /spl mu/m super-luminescent diodes," Electron. Lett., **42**, 21, 1245 (2006).

[103] Yamatoya T., Mori S., Koyama F., Iga K. Jpn. J., "High power GaInAsP/InP strained quantum well superluminescent diode with tapered active region," Appl. Phys., **38**, 1, 9A, 5121 (1999).

[104] Zhang Z.Y., Hogg R.A., Jin P., Choi T.L., Xu B., Wang Z.G., "High-Power Quantum-Dot Superluminescent LED With Broadband Drive Current Insensitive Emission Spectra Using a Tapered Active Region," IEEE Phot. Tech. Lett., **20**, 10, 782 (2008).

[105] Андреева Е.В., Батрак Д.В., Богатов А.П., Лапин П.И., Прохоров В.В., Якубович С.Д., "Мощный многомодовый суперлюминесцентный диод с длиной волны излучения 840 нм," Квантовая электроника, **37**, 11, 996 (2007).

[106] Causa F., Burrow L., "Ripple-Free High-Power Super-Luminescent Diode Arrays," IEEE J. Quantum Electron., **43**, 11, 1055 (2007).

[107] Du G., Xu C., Liu Y., Zhao Y., Wang H., "High-power integrated superluminescent light source," IEEE J. Quantum Electron., **39**, 1, 149 (2003).

[108] Zang Z., Minato T., Navaretti P., Hinokuma Y., Duelk M., Velez C., Hamamoto K., "High-Power (>100 mW) Superluminescent Diodes by Using Active Multimode Interferometer," IEEE Phot. Tech. Lett., **22**, 10, 721 (2010).

[109] Soldano L.B., Penning E.C.M., "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," J. Lightwave Technol., **13**, 4, 615 (1995).

[110] Лобинцов А.А., Успенский М.Б., Шишкин В.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д., "Высокоэффективный полупроводниковый оптический усилитель спектрального диапазона 820 — 860 нм," Квантовая электроника, **40**, 4, 305 (2010).

[111] Kwong N. S. "High-Power, Broad-Band 1550 nm Light Source by Tandem Combination of a Superluminescent Diode and an Er-Doped Fiber Amplifier," IEEE Photon. Tech. Lett., **4**, 9, 996 (1992).

[112] Baumgartner A., Hitzenberger C.K., Sattmann H., Drexler W., Fercher A.F., "Signal and Resolution Enhancements in Dual Beam Optical Coherence Tomography of the Human Eye," J. Biomed Opt., **3**, 45 (1998).

[113] Schmitt J. M., Lee S. L., and Yung K. M. "An optical coherence microscope with enhanced resolving power," Opt. Commun., **142**, 203 (1997).

[114] Адлер Д.С., Ко Т.Х., Конорев А.К., Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Фуджимото Дж.Дж., Якубович С.Д., "Широкополосный источник излучения на основе квантоворазмерных суперлюминесцентных диодов для оптической когерентной томографии высокого разрешения" Квантовая электроника, **34**, 10, 915 (2004)

[115] Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. "Сверхширокополосный мощный суперлюминесцентный диод с длиной волны излучения 920 нм," Квантовая электроника, **33**, 6, 471 (2003).

[116] Лобинцов А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д., "Полупроводниковые оптические усилители для спектрального диапазона 1000—1100 нм," Квантовая электроника, **38**, 7, 661 (2008).

[117] S. N. Ilchenko, Yu. O. Kostin, S. D. Yakubovich, "Highly efficient superluminescent diodes with central wavelengths of 1310 and 1550 nm," 9th Belarusian-Russian Workshop "Semiconductor Lasers and Systems" Minsk, Book of Papers, 92-94 (2013).