

Суперлюминесцентные диоды спектрального диапазона 1100–1230 нм на основе InAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктуры с квантовыми точками

Е.В.Андреева, А.Е.Жуков, В.В.Прохоров, В.М.Устинов, С.Д.Якубович

Исследованы суперлюминесцентные диоды (СЛД) на основе многослойной InAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктуры с квантовыми точками. Показано, что спектры выходного излучения СЛД сильно зависят от длины активного канала и тока инжекции. В частности, определены условия, когда в результате выравнивания интенсивностей квантовых переходов с 1-го и 2-го возбуждённых состояний спектр излучения перекрывает полосу 1100–1230 нм. В этом спектральном интервале серийно выпускаемые СЛД отсутствуют. Конструкция СЛД допускала работу в непрерывном режиме инжекции и эффективный ввод выходного излучения в одномодовый волоконный световод. Выходная мощность достигала 1 мВт в открытое пространство и 0,5 мВт при её выводе через световод. Предварительные ресурсные испытания продемонстрировали достаточно высокую надёжность разработанных СЛД.

Ключевые слова: суперлюминесцентные диоды, квантовые точки.

1. Введение

В последнее десятилетие наиболее интенсивно развивающимся научным направлением полупроводниковой квантовой электроники является разработка лазерных диодов на основе гетероструктур с квантовыми точками в активной области [1]. К достоинствам таких лазеров относятся рекордные значения пороговой плотности тока, α -фактора, параметра T_0 , определяющего температурные зависимости их физических характеристик, возможность изготовления лазеров спектрального диапазона 1300–1550 нм на подложках из GaAs и др. Наибольшие успехи достигнуты при использовании гетероструктур с самоорганизующимися квантовыми точками в системе InAs/AlGaAs/GaAs, выращиваемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В работах [2–4] сообщается о создании высокоэффективных лазерных диодов с длиной волны излучения в области 1300 нм на основе многослойных (до 10 активных слоёв) структур указанного типа. Использование таких структур позволило значительно повысить удельное оптическое усиление и отказаться от конструкций с экстремально длинными резонаторами (несколько миллиметров), ранее использовавшихся для лазеров на основе квантовых точек. Начато серийное производство таких лазеров. В частности, фирма NL Nanosemiconductor GmbH выпускает несколько моделей лазерных диодов спектрального диапазона 1200–1300 нм, в том числе «широкие» многомодовые лазеры с

выходной мощностью до 5 Вт в непрерывном режиме работы и высокоэффективные одномодовые лазеры с выходной мощностью до 300 мВт.

Количество публикаций, посвящённых исследованию лазерных диодов на основе квантовых точек, исчисляется сотнями. Что же касается аналогичных суперлюминесцентных диодов (СЛД), то их исследованию посвящено весьма ограниченное число статей. Как известно, основной особенностью СЛД является сочетание высокой яркости излучения, сравнимой с яркостью лазерных диодов, и широкого спектра (низкой когерентности). В теоретической работе [5] было показано, что при использовании квантовых переходов не только с основного, но и с возбуждённых состояний, в вышеупомянутой гетероструктуре на основе InAs/AlGaAs/GaAs с квантовыми точками возможно создание СЛД с шириной спектральной полосы излучения 100–200 нм. Публикации, посвящённые экспериментальным исследованиям СЛД с квантовыми точками, представляют собой весьма пёструю картину. Без претензий на полноту обзора отметим некоторые из них.

В работе [6] исследованы образцы с активным каналом длиной 2 мм и шириной 100 мкм на основе трёхслойной $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}/\text{GaAs}$ -гетероструктуры с квантовыми точками. Длина волны излучения, соответствующего квантовым переходам с основного состояния в этой структуре, составляла 1180 нм. Никаких мер по подавлению обратной связи принято не было. При импульсной накачке получена ватт-амперная характеристика лазерного типа, выходная оптическая мощность равнялась 0,9 Вт. Спектральный максимум излучения находился в области 1020 нм, а полуширина спектра составляла 80 нм, что указывает на преобладание квантовых переходов с возбуждённых состояний. Спектр излучения с достаточно высоким разрешением или его автокорреляционная функция (АКФ) не измерялись. На совести авторов работы [6] остаётся то, что они назвали эти образцы СЛД. Данное замечание относится и к работе [7],

Е.В.Андреева, В.В.Прохоров. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, п/я 70; e-mail: prokhorov@rambler.ru
А.Е.Жуков, В.М.Устинов. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26; e-mail: zhukov@beam.ioffe.ru
С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 117454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

где были исследованы образцы на основе пятислойной $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ -гетероструктуры с квантовыми точками. Ширина активного канала диодов составляла 10 мкм, его длина варьировалась от 0.8 до 1.6 мм. Для подавления обратной связи ось активного канала располагалась под углом 6° к торцевым граням кристалла. Выходная оптическая мощность в непрерывном режиме инжекции достигала 200 мВт, полуширина огибающей спектра с центральной длиной волны около 1000 нм составляла примерно 40 нм. Данные по остаточной спектральной модуляции (ripple) спектра или его автокорреляционной функции отсутствовали. Наш опыт указывает на то, что одно лишь наклонное расположение активного канала, без дополнительного нанесения на торцевые грани антиотражающих покрытий, редко обеспечивает достаточное подавление обратной связи.

В работе [8] исследован полупроводниковый лазерный усилитель на основе шестислойной гетероструктуры $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ с квантовыми точками. Как известно, в отсутствие входного сигнала в режиме усиления собственного спонтанного излучения любой усилитель представляет собой СЛД. В рассматриваемой работе для подавления обратной связи ось активного канала шириной 4 мкм и длиной 2.4 мм располагалась под углом 6.8° к торцевым граням. Антиотражающее покрытие также не использовалось. Полуширина спектра суперлюминесценции с центральной длиной волны около 1290 нм составляла примерно 40 нм, что соответствует квантовым переходам с основного состояния. В области спектрального максимума глубина остаточной модуляции модами Фабри – Перо достигала 2 дБ. Для большинства практических приложений СЛД это значение должно быть как минимум на порядок меньше. В ходе эксперимента была реализована стыковка излучателя с входным и выходным одномодовыми волоконными световодами (ОВС). Коэффициент ввода/вывода излучения не был указан, отмечалось только, что он далёк от оптимального.

Забегая вперёд, можно сказать, что результаты настоящей работы наиболее близки к результатам [9, 10], где исследовались СЛД на основе пятислойной гетероструктуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ с квантовыми точками, в которой параметр x ступенчато изменялся от слоя к слою в диапазоне 0.09–0.15. Для подавления обратной связи ось активного канала длиной 4 мм и шириной 8 мкм располагалась под углом 7° к торцевым граням. Антиотражающие покрытия торцов не использовались. «Двугорбый» спектр излучения, соответствующий квантовым переходам с основного и первого возбуждённого состояний, перекрывал полосу 1165–1286 нм. Образцы СЛД работали только в импульсном режиме, выходная мощность в открытом пространстве достигала 1.5 мВт при амплитуде импульса тока инжекции около 1.0 А.

После разработки и выпуска для продажи эффективных СЛД, спектр излучения которых перекрывает полосу 900–1100 нм [11, 12], в спектре серийно выпускаемых СЛД ИК диапазона остался зазор, а именно, непокрытая полоса 1100–1250 нм. Цель настоящей работы – по возможности закрыть этот зазор, т.е. создать соответствующие прототипы СЛД-модулей с выводом излучения через ОВС, допускающих непрерывный режим работы и обладающих приемлемым сроком службы. Авторы отдавали себе отчёт в том, что при использовании гетероструктуры с квантовыми точками не приходится

рассчитывать на столь же высокую внешнюю эффективность, как у «коротковолновых» излучателей – СЛД на основе квантоворазмерных $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ -гетероструктур (КРС), или у «длинноволновых» излучателей – СЛД на основе объёмных гетероструктур и КРС в системе $(\text{InGa})\text{PAs}$.

2. Экспериментальные образцы

Гетероструктуры, использованные для изготовления экспериментальных образцов СЛД, были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в установке Riber с использованием твердотельного источника мышьяка большого объёма типа Valved Cracker. На подложку GaAs n-типа ориентации (100) были последовательно эпитаксиально осаждены буферный слой n-GaAs, нижний эмиттерный слой n-AlGaAs толщиной 1.5 мкм, не легированный волноводный слой толщиной около 0.35 мкм, содержащий активную область, верхний эмиттерный слой p-AlGaAs толщиной около 1.5 мкм и контактный слой p-GaAs толщиной около 0.3 мкм. Активная область представляет собой десять слоёв самоорганизующихся квантовых точек $\text{InAs}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$, разделённых между собой прослойками GaAs толщиной около 33 нм. Режимы формирования и конструкция структур аналогичны использованным для создания высокоэффективных (свыше 80 %) лазеров спектрального диапазона 1.25–1.3 мкм [2, 3].

Образцы СЛД имели стандартную конфигурацию, подробно описанную в [11]. Ось активного канала шириной 4 мкм была наклонена под углом 7° по отношению к нормали к торцевым граням кристалла. Использованный комплект фотолитографических шаблонов позволял варьировать длину активного канала L_a с шагом 100 мкм вплоть до $L_a = 1800$ мкм. На торцевые грани было нанесено двухслойное антиотражающее $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -покрытие, остаточный коэффициент отражения которого в полосе 1050–1300 нм не превышал 0.5%. Оценки показывают, что эффективный коэффициент отражения на торцах СЛД не превышал 10^{-4} . Образцы напаивались на медные теплоотводы r-стороной вверх. Все измерения проводились в непрерывном режиме инжекции в условиях термостабилизации с использованием электронного драйвера ILX-LDC-3900.

3. Физические характеристики исследованных СЛД

На рис.1 представлены ватт-амперные характеристики СЛД с различными длинами активных каналов L_a в непрерывном режиме инжекции. В отличие от характеристик традиционных СЛД на основе объёмных и квантоворазмерных гетероструктур они имеют необычную форму, похожую на форму характеристик светоизлучающих диодов. Это объясняется сравнительно низким удельным оптическим усилением и очень малым коэффициентом диссипативных оптических потерь в данной гетероструктуре (менее 1.5 см^{-1}), что обеспечивает низкий порог прозрачности. С увеличением уровня накачки происходит плавное возрастание доли суперлюминесценции в выходном излучении. Этот процесс протекает тем эффективнее, чем больше длина активного канала СЛД. В ходе этого процесса в дальнем поле излучения формируется типичная для СЛД данной конструкции

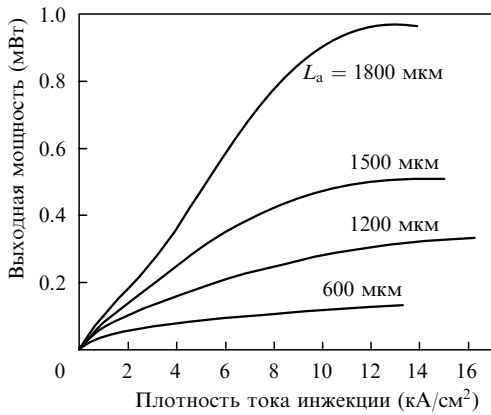


Рис.1. Ватт-амперные характеристики СЛД с различными длинами активного канала L_a .

диаграмма направленности с серповидным сечением светового пучка (рис.2).

В большинстве практических применений СЛД используются светоизлучающие модули с выводом излучения через ОВС. В настоящей работе был исследован ввод излучения разработанных СЛД в стандартный одномодовый световод Corning Pure Mode NI780 с диаметром моды 5.0 мкм. Ввод излучения производился через торцевую цилиндрическую микролинзу. На рис.3 представлены результаты измерений коэффициента ввода для СЛД с $L_a = 1800$ мкм. В развитом режиме суперлюминесценции коэффициент ввода излучения в ОВС превышает 50%. Ватт-амперная характеристика излучения, выводимого через ОВС, имеет традиционную суперлинейную форму. Очевидно, что использование широко распространённого коммуникационного ОВС SMF-28 с диаметром моды 9.2 мкм позволило бы получить больший коэффициент ввода, однако, к сожалению, это волокно имеет длину волны отсечки 1240–1260 нм и в рассматриваемом спектральном диапазоне не является одномодовым.

Типичная эволюция спектра излучения исследованных СЛД с изменением тока инжекции приведена на

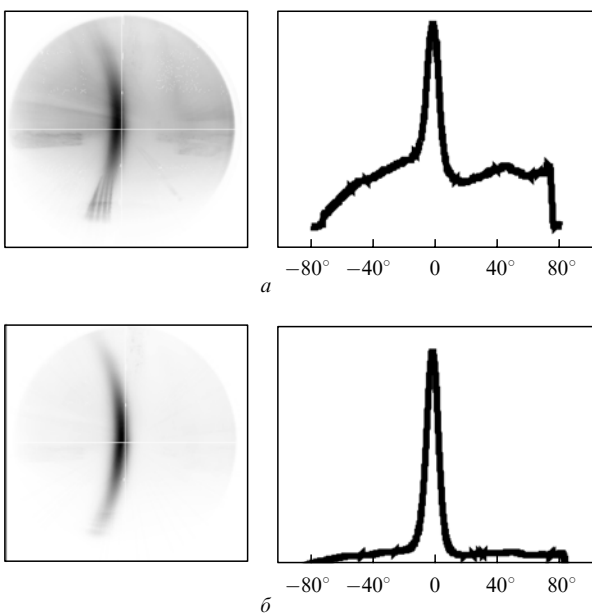


Рис.2. Сечение выходного пучка и угловое распределение интенсивности излучения в плоскости p–n-перехода СЛД ($L_a = 1800$ мкм) при токе инжекции $I = 50$ (а) и 400 мА (б).

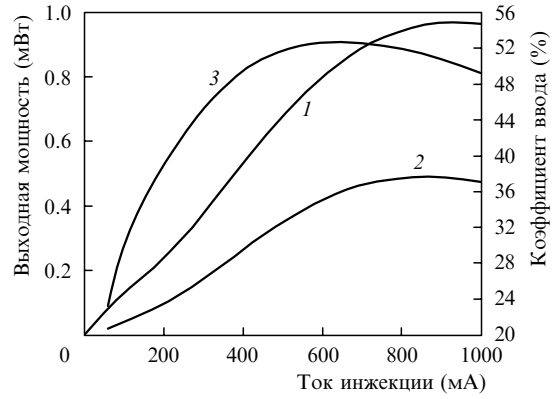


Рис.3. Ватт-амперные характеристики СЛД ($L_a = 1800$ мкм) при выводе излучения в открытое пространство (1) и через ОВС (2); 3 – коэффициент ввода излучения в ОВС.

рис.4. С увеличением тока последовательно появляются спектральные максимумы, соответствующие квантовым переходам с основного состояния ($\lambda = 1270$ нм), а также с первого ($\lambda = 1180$ нм) и со второго ($\lambda = 1120$ нм) возбуждённых состояний. При этом важнейшая характеристика СЛД – ширина спектра излучения – достигает максимальных значений при выравнивании амплитуд первого и второго или второго и третьего спектральных максимумов. Последний случай представляет больший практический интерес, т.к. при этом выходная мощность СЛД значительно выше. В табл.1 представлены основные физические характеристики СЛД с $L_a = 600, 1200$ и 1500 мкм в указанном режиме работы при температуре 20 °С. Параметры СЛД с $L_a = 600$ мкм не представляют практического интереса из-за малости выходной мощности. У СЛД с $L_a = 1800$ мкм вплоть до насыщения выходной мощности достичь выравнивания амплитуд второго и третьего спектральных максимумов не удалось. Что же касается образцов с $L_a = 1200$ и 1500 мкм, то их параметры представляют несомненный практический интерес. Ответ на вопрос, какая из комбинаций параметров предпочтительнее, должны дать ресурсные испытания, требующие продолжительного времени.

В ряде практических применений СЛД выдвигаются жесткие требования к форме спектра излучения. Часто необходимо, чтобы она минимально отличалась от гауссовой, когда центральный пик автокорреляционной функции излучения не содержит «пьедестала» или он слабо выражен. Такой спектр удалось получить, используя

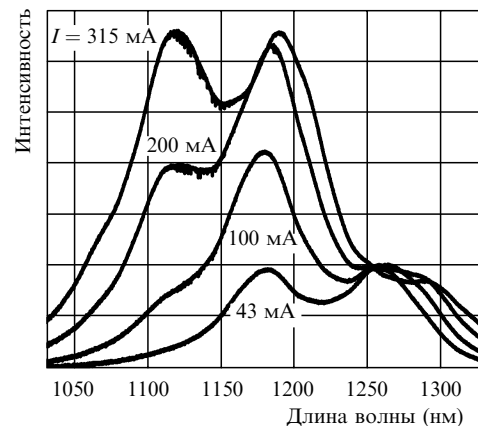


Рис.4. Эволюция спектра излучения СЛД ($L_a = 600$ мкм) в зависимости от тока инжекции I .

Табл.1. Характеристики СЛД с различной длиной активного канала L_a при максимальной ширине спектра излучения $\Delta\lambda$.

L_a (мкм)	I (мА)	J (кА/см ²)	P_{fs} (мВт)	P_{sm} (мВт)	K_c (%)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	δs (%)	L_{coh} (мкм)
600	320	13.3	0.13	0.02	15	1154	148	20	9.4
1200	780	16.3	0.33	0.10	30	1165	125	40	10.8
1500	900	15.0	0.51	0.20	40	1164	117	55	11.4

Примечание: I – ток инжекции; J – плотность тока инжекции; P_{fs} – выходная мощность в открытом пространстве; P_{sm} – выходная мощность через ОВС; K_c – коэффициент ввода излучения в ОВС; λ_m – медианная длина волны; $\Delta\lambda$ – спектральная полуширина; δs – глубина провала между спектральными максимумами; TE/TM – поляризационное отношение; L_{coh} – длина когерентности излучения.

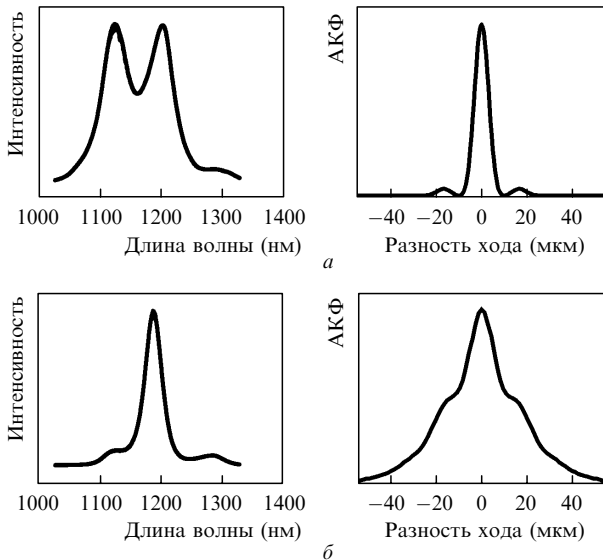


Рис.5. Спектры и автокорреляционные функции излучения двух СЛД при $L_a = 1200$ мкм, $I = 780$ мА, $P_{sm} = 0.1$ мВт (а) и $L_a = 1800$ мкм, $I = 600$ мА, $P_{sm} = 0.4$ мВт (б); $t = 20^\circ\text{C}$.

СЛД с $L_a = 1800$ мкм в режиме работы, когда в выходном излучении доминируют квантовые переходы с первого возбуждённого состояния. При этом выходная мощность заметно превышала достигнутую у СЛД с «широкими» спектрами (рис.5). Температурные зависимости выходной мощности и коэффициента ввода мощности в ОВС для тех же СЛД при тех же токах инжекции представлены на рис.6.

Рабочие токи и потребляемая электрическая мощность исследованных СЛД заметно выше, чем у серийных СЛД как ближнего ($\lambda < 1100$ нм), так и среднего ($\lambda > 1250$ нм) диапазонов ИК спектра. Поэтому вопрос об их

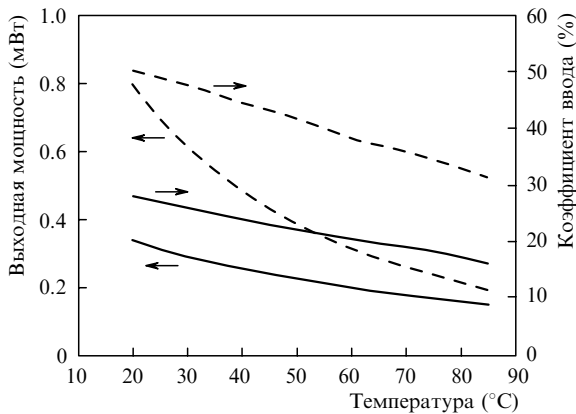


Рис.6. Зависимости выходной оптической мощности и ее коэффициента ввода в ОВС от температуры для СЛД с $L_a = 1200$ мкм при $I = 780$ мА (сплошные кривые) и СЛД с $L_a = 1800$ мкм при $I = 600$ мА (штриховые кривые).

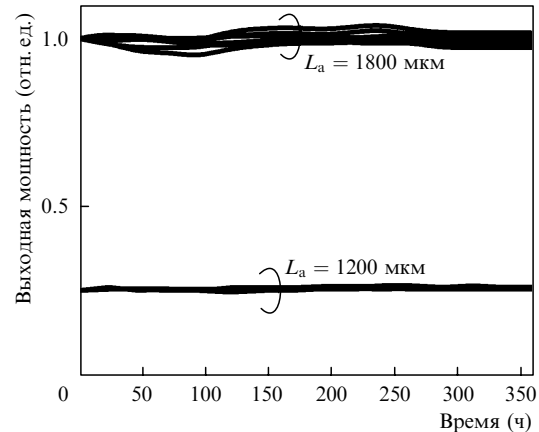


Рис.7. Зависимость выходной мощности от времени наработки двух групп СЛД с $L_a = 1200$ и 1800 мкм.

надёжности стоит очень остро. В рамках данной работы были проведены предварительные ресурсные испытания двух малых партий СЛД с $L_a = 1200$ мкм и $L_a = 1800$ мкм при температуре 25°C и токе инжекции $I = 400$ мА, ограниченном возможностями соответствующего оборудования. Результаты этих испытаний показаны на рис.7. В их ходе не было отмечено проявлений «детской смертности» ни одного из образцов. Спад выходной мощности за 400 ч работы не превысил 2.0%. Это весьма обнадеживающий результат. Оптимизма добавляет и то, что лазеры производства NL Nanosemiconductor GmbH на основе аналогичной гетероструктуры с квантовыми точками, работающие при несколько меньших плотностях тока инжекции, но со значительно большей лучевой нагрузкой на торцевые грани, обладают очень большим медианным временем жизни.

4. Заключение

На основе проведённых исследований разработаны прототипы двух новых СЛД-модулей в стандартных корпусах Butterfly с элементами Пельтье, термистором для термостабилизации и с выводом излучения через ОВС (условно – модели SLD-541 и SLD-551), основные технические характеристики которых представлены ниже.

	SLD-541	SLD-551
Ток инжекции (мА)	< 800	< 650
Напряжение (В)	< 2.2	< 2.2
Выходная оптическая мощность через ОВС (мВт)	≥ 0.1	≥ 0.4
Медианная длина волны излучения (нм)	1160	1190
Полуширина спектра излучения	> 100	> 30

Глубина спектрального провала (%)	< 50	–
Глубина остаточной спектральной модуляции (%)	< 0.5	< 0.5
Поляризационное отношение TE/TM	> 20	> 100
Диапазон рабочих температур (°C)	–55 ÷ +70	–55 ÷ +70

В последние два года большое распространение получили широкополосные источники света серии BroadLighter, в которых осуществляется суперпозиция излучений двух и более СЛД-модулей. Они используются в оптической когерентной томографии и в различных областях оптической метрологии. На рис.8 приведены спектральные полосы излучения различных моделей этих приборов и ценное добавление к ним – полоса излучения SLD-541.

Очевидно, что уровень выходной мощности исследованных СЛД будет заметно выше в импульсном режиме инжекции. Однако этот режим редко используется в практических применениях. Определённого выигрыша в непрерывной выходной мощности можно достичь путём напаивания СЛД на теплоотводы р-стороной вниз, но такая конструкция сильно усложняет и удорожает сборку модулей с выводом излучения через ОВС. Изготовление на основе использованной гетероструктуры образцов с большей длиной активного канала ($L_a > 2000$ мкм) позволит создать СЛД, спектр которых будет перекрывать диапазон 1150–1300 нм, а уровень выходной мощности значительно превысит достигнутый в настоящей работе. Дальнейшее совершенствование характеристик подобных СЛД связано с созданием аналогичных гетероструктур с большим числом активных слоёв и с большей концентрацией в них квантовых точек.

Работа поддержана РФФИ, Фондом содействия отечественной науке, Минобрнауки РФ (проект РНП.2.1.1.1094), грантом Президента РФ № МД-4277.2004.2.

Авторы выражают благодарность А.Т.Семёнову за ценные рекомендации.

1. Ledentsov N.N., Grundmann M., Heinrichsdorf F., Bimberg D., Ustinov V.M., Zhukov A.E., Maximov M.V., Alferov Zh.I., Lott J.A. *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron.*, **6** (3), 439 (2000).

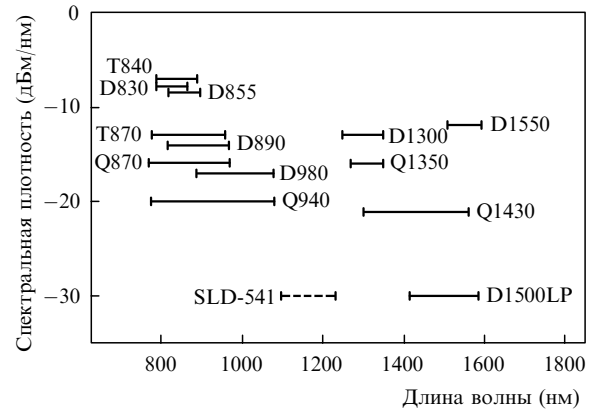


Рис.8. Спектральные полосы модуля SLD-541 и источников излучения серии BroadLighter.

2. Kovsh A.R., Maleev N.A., Zhukov A.E., Mikhlin S.S., Vasil'ev A.R., Shemyakov Yu.M., Maximov M.V., Livshits D.A., Ustinov V.M., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Bimberg D. *Electron. Lett.*, **38** (19), 1104 (2002).

3. Zhukov A. E., Kovsh A.R, Mikhlin S.S, Vasil'ev A.P., Semenova E. S., Maleev N. A., Ustinov V. M., Kulagina M. M., Nikitina E. V., Soshnikov I. P., Shernyakov Yu. M., Livshits D. A., Kryzhanovskaya N. V., Sizov D. S., Maximov M. V., Tsatsul'nikov A. F., Ledentsov N. N., Bimberg D., Alferov Zh. I. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **17**, 589 (2003).

4. Лившиц Д.А., Ковш А.Р., Жуков А.Е., Малеев Н.А., Михрин С.С., Васильев А.П., Никитина Е.В., Устинов В.М., Леденцов В.Н., Лин Г., Чи Ж. *Письма в ЖТФ*, **30** (1), 21 (2004).

5. Sun Z., Ding D., Gong Q., Zhou W., Xu B., Wang Z. *Opt. and Quant. Electron.*, **31**, 1235 (1999).

6. Heo D.C., Song J.D., Choi W.J., Lee J.I., Jung J.C., Han I.K. *Electron. Lett.*, **39** (11), 863 (2003).

7. Zhang Z.Y., Wang Z.G., Xu B., Jin P., Lin F.Q. *IEEE Photon Tech. Lett.*, **16** (1), 27 (2004).

8. Bakonyi Z., Su H., Onishchukov G., Lester L.F., Grey A.L., Newell T.C., Tunnermann A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **39** (11), 1409 (2003).

9. Li L.H., Rossetti M., Fiore A., Occhi L., Velez C. *Electron. Lett.*, **41** (1), 27 (2005).

10. Li L.H., Rossetti M., Fiore A. *J. Crystal Growth*, **278**, 680 (2005).

11. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **33** (6), 471 (2003).

12. Лапин П.И., Мамедов Д.С., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 315 (2006).