

Двухсекционные широкополосные суперлюминесцентные диоды

Ю.О.Костин, С.Д.Якубович

Экспериментально исследованы суперлюминесцентные диоды (СЛД) с двумя электрически изолированными участками инжекции на основе однослойной квантоворазмерной гетероструктуры (ОКРС) в системе GaAlAs/GaAs с центральной длиной волны излучения около 825 нм. Показано, что при различных комбинациях токов, инжектируемых в секции, СЛД такого типа позволяют получить любую непрерывную выходную мощность от единиц до почти сотни милливатт при неизменной (~70 нм) ширине спектра излучения.

Ключевые слова: суперлюминесцентный диод, квантоворазмерные гетероструктуры.

1. Введение

Эту статью можно было бы назвать «Опять двойка» ...

Скорее после создания полупроводниковых лазеров началось исследование двухсекционных («разрезных») лазерных диодов (ЛД) [1, 2]. Результаты исследований двух- и многосекционных ЛД, опубликованные во множестве научных работ, показали, что по функциональным возможностям они значительно превосходят традиционные ЛД с однородной инжекцией. В первую очередь это относится к динамике излучения (см., напр., [3]). В настоящее время эти оптоэлектронные элементы нашли практическое применение во многих областях техники. Достаточно указать, что большая часть передатчиков волоконно-оптических телекоммуникационных систем со спектральным уплотнением строится на основе многосекционных ЛД.

Что касается суперлюминесцентных диодов (СЛД), то они также часто имеют двухсекционную конструкцию, но при этом одна из секций используется только в качестве поглотителя для подавления оптической обратной связи. Конструкция СЛД с двумя изолированными участками инжекции, впервые исследованная в [4], используется очень редко, хотя очевидно, что она дает дополнительную степень свободы в управлении выходными характеристиками излучателя.

В последнее десятилетие широкое распространение получили широкополосные СЛД на основе квантоворазмерных гетероструктур (КРС), спектр излучения которых определяется квантовыми переходами из двух и более подзон энергетического спектра. При этом ширина спектра и степень когерентности излучения сильно зависят как от конструкции СЛД, так и от его эксплуатационных условий. Типичные примеры трансформации спектра излучения таких СЛД с изменением уровня на-

качки при разных длинах активного канала приведены в [5, 6]. Светоизлучающие модули на основе подобных СЛД используются, главным образом, в качестве источников излучения для различных интерферометрических систем, в частности для бурно развивающейся оптической когерентной томографии (ОКТ) [7]. Как правило, основным техническим требованием к этим источникам является обеспечение максимально достижимой ширины спектра излучения (минимальной длины когерентности).

Однако, наряду с этим, жесткие требования часто предъявляются и к величине выходной оптической мощности. Одновременное выполнение этих требований зачастую оказывается весьма сложной задачей. На рис.1 приведены типичные зависимости полуширины спектра излучения $\Delta\lambda$ от тока инжекции I_{SLD} для двух СЛД-модулей различных категорий из серии SLD-37, широко используемой для ОКТ. Зависимости $\Delta\lambda(I_{\text{SLD}})$ показывают, что значения $\Delta\lambda$, близкие к максимальному, реализуются в достаточно узком диапазоне токов, которые и опреде-

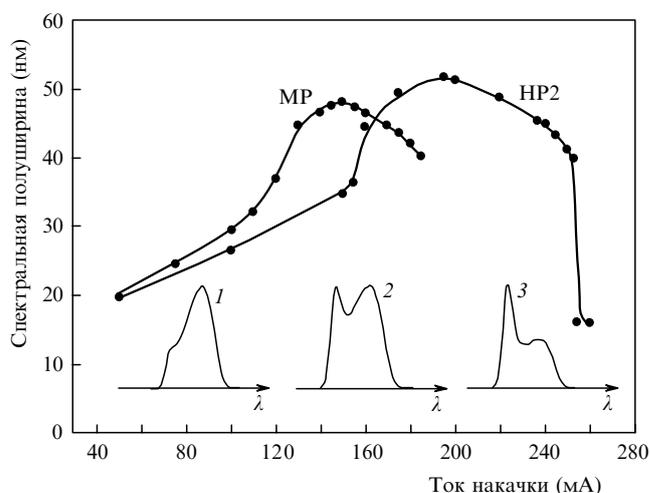


Рис.1. Типичные зависимости полуширины спектра излучения $\Delta\lambda$ (FWHM) от тока инжекции I_{SLD} для модулей SLD-37 категорий MP ($P_{\text{FS}} = 4 - 6$ мВт) и HP2 ($P_{\text{FS}} = 20 - 30$ мВт). На вставках показаны типичные формы спектра при малом уровне накачки (1), в области максимума $\Delta\lambda$ (2) и при высоком уровне накачки (3).

Ю.О.Костин, С.Д.Якубович. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, а/я 70; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 7 ноября 2008 г.

ляют выходную оптическую мощность P данного СЛД. Величину P можно варьировать в небольших пределах путем изменения рабочей температуры с соответствующей подстройкой тока инжекции, но это не всегда допускается условиями эксплуатации СЛД-модуля. Если же необходимо существенно изменить величину P , но сохранить $\Delta\lambda$ на максимальном уровне, то для этого при использовании пространственно однородной инжекции имеется практически единственное решение – изготовление новых образцов СЛД с большей или меньшей длиной активного канала L_a . Но и в таком случае при жестких допусках на величины P и $\Delta\lambda$ часть образцов СЛД из-за неизбежного технологического разброса параметров оказывается непригодной для данного конкретного применения. Простым решением могло бы стать использование СЛД с солидным запасом по выходной мощности и добавление в интерференционные схемы входного управляемого оптического аттенуатора. Однако для серийных систем ОКТ это неприемлемо, т.к. требует переработки как оптико-механических узлов, так и электронных схем управления.

Ввиду вышеизложенного, разработка СЛД на основе КРС, конструкция которых допускает плавное изменение выходной мощности в широких пределах с сохранением ширины спектра излучения на максимальном уровне, является весьма актуальной. Очевидный вариант такой конструкции – это СЛД с пространственно неоднородной инжекцией. Экспериментальному исследованию таких СЛД посвящена настоящая работа.

2. Экспериментальные образцы

Для изготовления экспериментальных образцов была использована полупроводниковая ОКРС в системе GaAlAs/GaAs, выращенная методом МОС-гидридной эпитаксии и отличающаяся от структур, которые обычно используются при производстве приборов серии SLD-37 [8], меньшей толщиной активного слоя. Для экспресс-анализа новых гетероэпитаксиальных пластин из них обычно изготавливаются пробные образцы светодиодов малых размеров, спектр излучения которых не искажен поглощением в неинжектируемых областях кристалла и суперлюминесценцией, т.е. соответствует практически «чистому» спонтанному излучению. Эти спектры позволяют прогнозировать спектральные характеристики СЛД на основе данной гетероструктуры, а после изготовления приборов и измерения их параметров – рассчитать спектры оптического усиления при различных уровнях накачки. Спектры спонтанного излучения пробных светодиодов, изготовленных из рассматриваемой ОКРС, изображены на рис.2. При выравненных спектральных максимумах полуширина спектра превышает 100 нм, а интервал между ними составляет ~ 40 нм. Это указывает на возможность реализации СЛД с рекордным для данного спектрального диапазона значением $\Delta\lambda$ – более 70 нм. Дальнейшие эксперименты подтвердили эту оценку.

Для проведения сравнительных исследований были изготовлены две партии образцов СЛД. Образцы типа I имели традиционную конструкцию. Их прямой активный канал представлял собой гребневый волновод шириной 4.0 мкм. Ось активного канала составляла угол 7° по отношению к нормали к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены диэлектрические посветляющие

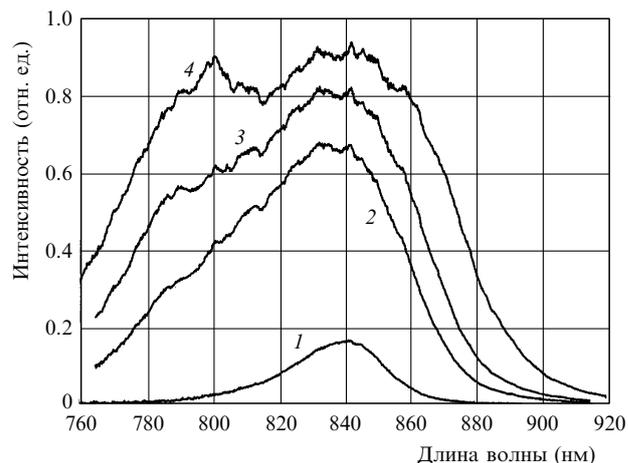


Рис.2. Спектры излучения пробных светодиодов на основе использованной ОКРС при плотностях тока инжекции 0.2 (1), 1.1 (2), 1.8 (3) и 3.5 kA/cm^2 (4).

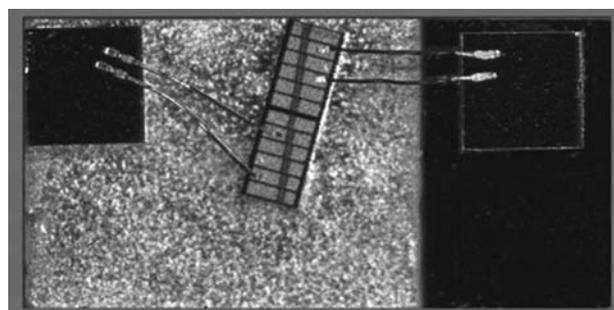


Рис.3. Внешний вид двухсекционного СЛД.

покрытия. Длина активного канала L_a могла варьироваться от 100 до 1600 мкм с шагом 100 мкм. Двухсекционные СЛД типа II (рис.3) с длиной активного канала $L_a = 1200$ мкм имели единственное конструктивное отличие от образцов типа I: в середине их активного канала методом ионного травления была сформирована канавка шириной 40 мкм, в пределах которой был полностью удален контактный слой p^+ -GaAs. Это обеспечило разделительное электрическое сопротивление между секциями около 2.5 кОм. Измерения выходных характеристик образцов обоих типов проводились в непрерывном режиме инжекции в условиях термостабилизации при 25°C с использованием электронных драйверов типа PLOT-4.

3. Результаты экспериментов

Основные характеристики выходного излучения СЛД типа I с различными длинами активного канала L_a в рабочих режимах, соответствующих максимальному значению $\Delta\lambda$ (выравненным спектральным максимумам), представлены в табл.1. В образцах с $L_a > 1200$ мкм выравнивать спектральные максимумы в непрерывном режиме инжекции не удавалось из-за перегрева диода и насыщения его выходной мощности или из-за катастрофической деградации. Приведенные данные показывают, что выходная мощность в указанном режиме очень сильно зависит от L_a . При изменении L_a в 3 раза (от 400 до 1200 мкм) выходная мощность в открытое пространство P_{FS} возрастает почти на два порядка. При этом $\Delta\lambda$ уменьшается слабо, оставаясь в диапазоне 70–80 нм, а спект-

Табл.1. Основные характеристики выходного излучения образцов СЛД типа I с различными длинами активного канала.

L_a (мкм)	I_{SLD} (мА)	J (кА/см ²)	P_{FS} (мВт)	P_{SM} (мВт)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	ΔS (%)	R (%)
400	65	4.1	0.8	0.2	819	80	15	0.3
600	100	4.2	2.0	0.8	820	77	22	0.3
800	140	4.4	6.4	2.8	821	74	31	0.4
1000	200	5.0	21.5	10.0	822	71	39	0.5
1100	270	6.1	40.0	19.0	822	70.5	41	0.6
1200	350	7.3	72.5	34.3	823	70	44	0.7

Примечание: J – плотность тока инжекции; P_{FS} – выходная мощность в открытое пространство; P_{SM} – мощность на выходе одномодового световода; λ_m – медианная длина волны; ΔS – глубина спектрального провала; R – глубина остаточной модуляции спектра модами Фабри – Перо (Ripple).

ральный провал ΔS также возрастает в 3 раза, но не превышает 50%. Эти данные наглядно указывают на трудность обеспечения жестко заданного уровня выходной мощности.

В табл.2 представлены те же характеристики двухсекционного СЛД типа II. В данном эксперименте для получения различных значений выходной мощности при выравненных спектральных максимумах варьировались режимозадающие токи I_1 и I_2 и, как следствие, спектры спонтанного излучения и оптического усиления 1-й и 2-й секций. Как было указано выше, данные образцы СЛД были изготовлены на основе той же ОКРС, что и образцы типа I, и с использованием тех же фотолитографических шаблонов, задающих конфигурацию активного канала и контактных площадок. Различие технологических операций заключалось в дополнительном фотолитографическом процессе и в дополнительном процессе травления, обеспечивших электрическую изоляцию секций у образцов типа II.

К сожалению, при изготовлении СЛД типа II в ходе формирования гребневого волновода методом ионного травления было допущено некоторое перетравливание. В результате боковое электрическое и оптическое ограничение в этих СЛД оказалось более жестким, чем у образцов типа I. Как следствие, их диаграмма направленности излучения в плоскости p–n-перехода стала более широкой, а коэффициент ввода излучения в одномодовый световод оказался пониженным (ср. P_{FS} и P_{SM} у образцов типа I и типа II). Кроме того, внешняя эффективность двухсекционных СЛД повысилась (ср. P_{FS} при однородной инжекции образцов типа I с $L_a = 600$ и 1200 мкм и образца типа II при $I_2 = 0$ и $I_1 = I_2 = 196$ мА). По той же причине спектральные максимумы у образцов типа II оказались более острыми (рис.4), а провалы между ними и остаточная модуляция – более глубокими. Указанные различия могут быть устранены в результате оптимизации технологических процессов изготовления СЛД.

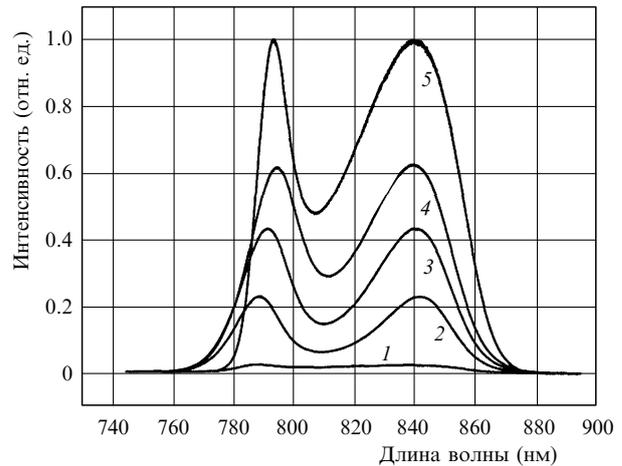


Рис.4. Спектры выходного излучения двухсекционного СЛД при различных комбинациях токов инжекции:

$I_1 = 105$ мА, $I_2 = 0$ (1), $I_1 = 192$ мА, $I_2 = 20$ мА (2), $I_1 = 251$ мА, $I_2 = 30$ мА (3), $I_1 = 289$ мА, $I_2 = 45$ мА (4), $I_1 = I_2 = 196$ мА (5).

Главным результатом настоящей работы можно считать экспериментальную демонстрацию достижения любого требуемого уровня выходной мощности из широкого диапазона ее возможных значений при сохранении ширины спектра излучения на максимальном уровне путем вариации токов инжекции двухсекционного СЛД. Использование двухканального драйвера, обеспечивающего режимозадающие токи I_1 и I_2 , является определенным неудобством, а для некоторых практических применений просто неприемлемо. Однако в тех случаях, когда от СЛД требуется обеспечить фиксированный уровень выходной мощности при достаточной ширине спектра, а именно это требуется от источника излучения практически во всех системах ОКТ, указанную трудность можно легко обойти. При сборке модуля между контактами 1-й и 2-й секций может быть установлен подстроечный ре-

Табл.2. Основные характеристики выходного излучения образцов СЛД типа II при различных комбинациях токов инжекции I_1 и I_2 .

I_1 (мА)	I_2 (мА)	P_{FS} (мВт)	P_{SM} (мВт)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	ΔS (%)	R (%)
105	0	2.77	0.805	820.6	76.6	35	0.2
128	10	5	1.6	820.2	76.5	58	0.2
170	15	10.84	4.01	818.9	75.3	70	0.2
192	20	16.1	6.04	818.7	74.4	73	0.3
251	30	30.93	12.11	818.9	72.5	66	0.7
289	45	46.15	17.96	820	69.9	54	1
281	75	62.98	25.54	821.4	67.8	44	1
266	95	71.8	29.54	822.1	67.7	43	1.2
239	125	79.88	32.6	822.8	68.6	46	1.2
196	196	90.22	37.12	824.4	69.3	53	1.5

зистор, обеспечивающий необходимое распределение тока инжекции, подаваемого через соответствующий пин-контакт модуля. Для пользователя такой модуль ничем не отличается от традиционных модулей на основе СЛД с однородной инжекцией. Более того, данная конструкция позволяет применять стандартные системы автоматического контроля выходной мощности, используя сигнал встроенного в модуль фотодиода-монитора, на который попадает излучение с задней грани СЛД. Спектр этого излучения при неоднородной инжекции может сильно отличаться от спектра излучения через переднюю выходную грань, однако его мощность монотонно зависит от общего тока.

4. Заключение

Экспериментально показано, что использование двухсекционной конструкции СЛД на основе КРС дает изготовителям широкополосных светоизлучающих модулей дополнительную степень свободы, позволяющую для каждого конкретного модуля плавно изменять выходную мощность в широких пределах, сохраняя при этом ширину спектра на максимальном для данной КРС уровне. Для двухсекционных СЛД на основе эксперимен-

тальной ОКРС в системе GaAlAs/GaAs при поддержании спектральной полуширины $\Delta\lambda$ около 70 нм диапазон возможных значений выходной мощности составил 2.8–90.2 мВт.

Авторы признательны А.Т.Семенову за инициирование проведенного исследования. Работа частично поддержана Министерством образования и науки РФ (проект РНП 2.1.1.1094).

1. Басов Н.Г., Никитин В.В., Семенов А.С. *УФН*, **97** (4), 561 (1969).
2. Ривлин Л.А., Семенов А.Т., Якубович С.Д. *Динамика и спектры излучения полупроводниковых лазеров* (М.: Радио и связь, 1983).
3. Батоврин В.К., Семенов А.Т., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 125 (1996).
4. Semenov A.T., Shidlovski V.R., Jackson D.A., Willsch R., Ecke W. *Electron. Lett.*, **32**, 255 (1996).
5. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **33** (6), 471 (2003).
6. Адлер Д.С., Ко Т.Х., Конорев А.К., Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Фуджимото Дж.Дж., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **34** (10), 915 (2004).
7. Kincade K. *Laser Focus World*, **44** (3), 49 (2008).
8. Батоврин В.К., Гармаш И.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Любарский А.В., Плявенок А.Г., Сафин С.А., Семенов А.Т., Шидловский В.Р., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996).