

Суперлюминесцентные диоды спектрального диапазона 770–790 нм на основе полупроводниковых наноструктур с узкими квантовыми ямами

А.С.Аникеев, Т.А.Багаев, С.Н.Ильченко, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк,
А.А.Падалица, К.М.Панкратов, В.Р.Шидловский, С.Д.Якубович

Проведено сравнительное экспериментальное исследование суперлюминесцентных диодов (СЛД), активные слои которых содержат одну, две или три квантовых ямы шириной около 5.0 нм каждая, симметрично расположенные в световедущем слое. Показано, что увеличение числа ям приводит к сужению спектра суперлюминесценции и ослаблению зависимости его ширины от уровня накачки. При этом степень поляризации выходного излучения заметно возрастает. В частности, реализованы обладающие достаточно высокой надежностью мощные узкополосные СЛД со спектральной полушириной менее 8 нм и поляризационным отношением TE/TM, превышающим 20 дБ.

Ключевые слова: полупроводниковая наногетероструктура, квантоворазмерный суперлюминесцентный диод.

1. Введение

Серийно выпускаемые суперлюминесцентные диоды (СЛД) «ближайшего» ИК диапазона спектра (750–800 нм) обладают непрерывной выходной оптической мощностью до 50 мВт при полуширине (FWHM) спектра излучения $\Delta\lambda = 15–50$ нм, причем мощность ограничивается тепловым насыщением или деградиационными процессами, а полуширина спектра определяется составом и геометрией используемой полупроводниковой гетероструктуры и конфигурацией активного канала СЛД. Двусторонние гетероструктуры с разделным ограничением фотонов и носителей заряда (РО ДГС) с «объемным» активным слоем или, наоборот, с квантоворазмерным активным слоем (SQW) толщиной в единицы нанометров позволяют реализовать СЛД со спектром квазигауссовой формы и $\Delta\lambda = 15–30$ нм. При использовании квантовой ямы шириной около 10 нм регистрируются двугорбые спектры с $\Delta\lambda$ до 50 нм [1], форма которых определяется квантовыми переходами из основной и возбужденной подзон энергетического спектра. Такие СЛД достаточно широко используются в качестве источников света для оптической когерентной томографии (ОКТ) как сами по себе, так и в составе комбинированных источников света серии Broad-Lighter [2, 3].

В последнее время появились метрологические применения СЛД вышеуказанного спектрального диапазона, для которых ширина спектра существующих прибо-

ров является избыточной, а их спектральная плотность излучения (максимум 3–4 мВт/нм) – недостаточной.

В настоящей работе проведено сравнительное экспериментальное исследование СЛД, активные слои которых представляют собой одну (SQW-Тип I), две (DQW-Тип II) или три (TQW-Тип III) симметрично расположенные в волноводном слое квантовые ямы шириной около 5.0 нм одинакового состава $\text{Ga}_{0.93}\text{Al}_{0.07}\text{As}$. Получены зависимости мощностных, спектральных и поляризационных характеристик этих приборов от конфигурации активного канала, уровня накачки и рабочей температуры. В частности, реализованы достаточно надежные узкополосные СЛД со спектральной плотностью выходного излучения, превышающей 12 мВт/нм.

2. Экспериментальные образцы

На рис.1 схематично представлены зонные диаграммы использованных наногетероструктур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Технология выращивания кратко описана в [4]. В отличие от указанной работы, в которой варьировались ширина и химический состав активного слоя SQW-структуры, в настоящей работе ширина и состав квантовых ям и барьерных слоев оставались неизменными. Варьировалось только количество ям.

Конструкция СЛД была традиционной для пространственно одноимодовых приборов. Активный канал представлял собой гребневидный волновод толщиной около

А.С.Аникеев. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049 Москва, Ленинский просп., 4
Т.А.Багаев, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица. ООО «Сигм плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3
С.Н.Ильченко, К.М.Панкратов, В.Р.Шидловский. ООО «Оптон», Россия, 119330 Москва, ул. Мосфильмовская, 176
С.Д.Якубович. Московский технологический университет (МИРЭА), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78;
e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 25 апреля 2019 г., после доработки – 28 мая 2019 г.

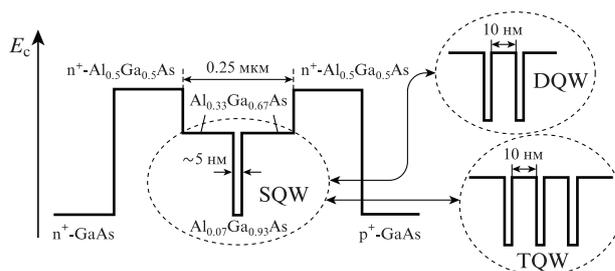


Рис.1. Зонные диаграммы использованных наногетероструктур.

0.25 мкм и шириной 4 мкм, его ось имела наклон 7° по отношению к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены антиотражающие покрытия. Длина активного канала L_a варьировалась в пределах 600 – 1800 мкм. Измерения проводились в непрерывном режиме инжекции в условиях термостабилизации СЛД.

3. Экспериментальные результаты

Спектры излучения всех исследованных образцов имели колоколообразную (близкую к гауссовой) форму в широком диапазоне изменения тока инжекции. Что касается спектральной полуширины $\Delta\lambda$, то эта величина существенно зависит от длины активного канала L_a . На рис.2 показаны спектры излучения СЛД типов I–III с различными длинами L_a при одинаковых токах инжекции I , снятые при комнатной температуре. Приведенные кривые нагляд-

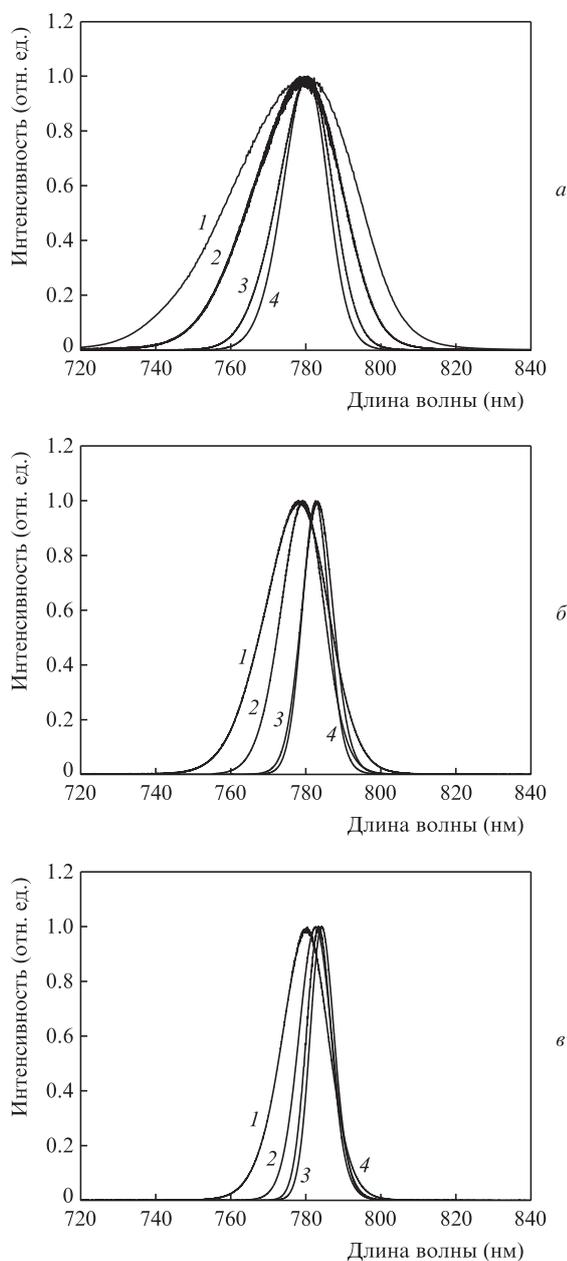


Рис.2. Спектры излучения СЛД типов I (а), II (б) и III (в) при токе инжекции 170 мА, температуре $T = 25^\circ\text{C}$ и длинах активного канала $L_a = 600$ (1), 900 (2), 1500 (3) и 1800 мкм (4).

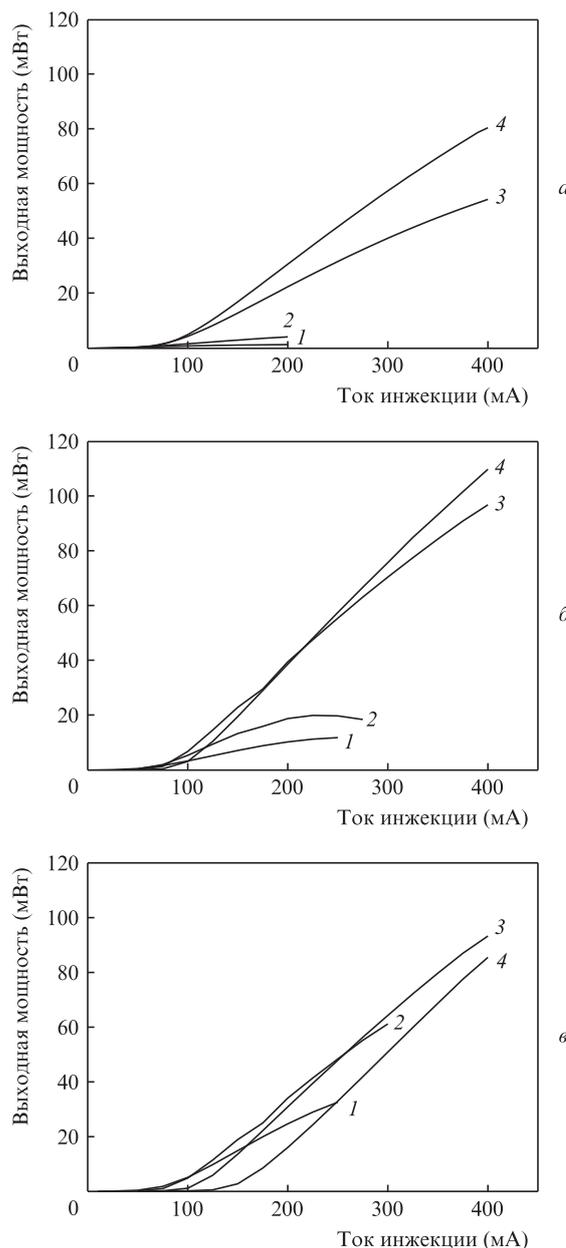


Рис.3. Ватт-амперные характеристики СЛД типов I (а), II (б) и III (в) с длинами $L_a = 600$ (1), 900 (2), 1500 (3) и 1800 мкм (4) при $T = 25^\circ\text{C}$.

но иллюстрируют сужение спектра с ростом длины активного канала и с увеличением числа квантовых ям в активном слое.

Основные характеристики исследованных СЛД в тех же рабочих условиях представлены в табл.1. Видно, что при переходе от образцов типа I к образцам типов II и III помимо сужения спектра происходит заметное увеличение дифференциальной квантовой эффективности и значительное увеличение степени поляризации излучения. Последнее весьма ценно для некоторых практических применений СЛД, т. к. позволяет избавиться от использования внешних поляризаторов.

Ватт-амперные характеристики (рис.3) и зависимости $\Delta\lambda(I)$ (рис.4) показывают, что выходная оптическая мощность может изменяться в широких пределах в зависимости от уровня накачки и для «длинных» образцов СЛД типов II и III превышать 100 мВт, что соответствует спектральной плотности более 12 мВт/нм. По нашим сведе-

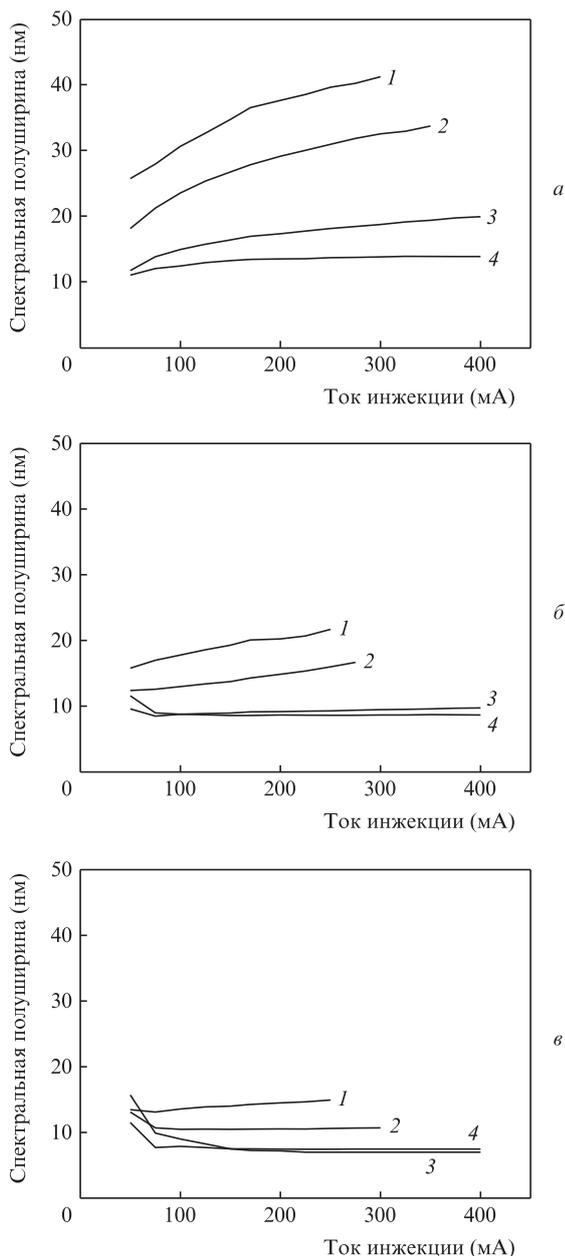


Рис.4. Зависимости $\Delta\lambda$ от тока инжекции для СЛД типов I (а), II (б) и III (в) с длинами $L_a = 600$ (1), 900 (2), 1500 (3) и 1800 мкм (4) при $T = 25^\circ\text{C}$.

ниям, это рекордная величина для пространственно одномодовых СЛД. При этом $\Delta\lambda$ слабо меняется с изменением тока и зависит, главным образом, от длины активного канала.

На рис.5 представлены зависимости поляризационного отношения TE/TM от тока инжекции для «длинных» образцов СЛД ($L_a = 1500$ мкм). Эти зависимости для образцов типа I разительно отличаются от зависимостей для типов II и III. В первом случае с началом суперлюминесцентного излучения отношение TE/TM достигает своего максимального значения (около 11) и при дальнейшем росте тока накачки медленно уменьшается. Для образцов типа II максимальное значение (около 105) достигается при достаточно высокой мощности суперлюминесцентного излучения. И, наконец, для образцов типа III при токе инжекции $I = 400$ мА, близком к порогу катастрофической оптической деградации, отношение TE/TM

Табл.1. Характеристики СЛД с шириной квантовых ям около 5.0 нм при токе инжекции 170 мА.

Тип активного слоя	L_a (мкм)	I (мА)	J (кА/см ²)	P_{FS} (мВт)	P_{SM} (мВт)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	TE/TM
I (SQW)	600	170	7.1	1.3	0.35	774	37	2.1
	900	170	4.7	3.5	1.2	775	27	3.5
	1500	170	2.8	15	7	778	17	10.5
	1800	170	2.4	23	13	779	14	13.2
II (DQW)	600	170	7.1	8.5	4.5	777	20	10
	900	170	4.7	24	13	779	13.5	26.5
	1500	170	2.8	32	22	782	9	101
	1800	170	2.4	28	11	782	8.5	116
III (TQW)	600	170	7.1	17	10.5	779	14	22
	900	170	4.7	24	15	782	10.5	51
	1500	170	2.8	25	16	784	7.0	85
	1800	170	2.4	17	12	785	7.0	80

Примечание: L_a – длина активного канала; I – ток инжекции; J – плотность тока инжекции; P_{FS} – выходная мощность в открытом пространстве; P_{SM} – выходная мощность через одномодовый волоконный световод (ОВС); λ_m – медианная длина волны; $\Delta\lambda$ – спектральная полуширина; TE/TM – поляризационное отношение.

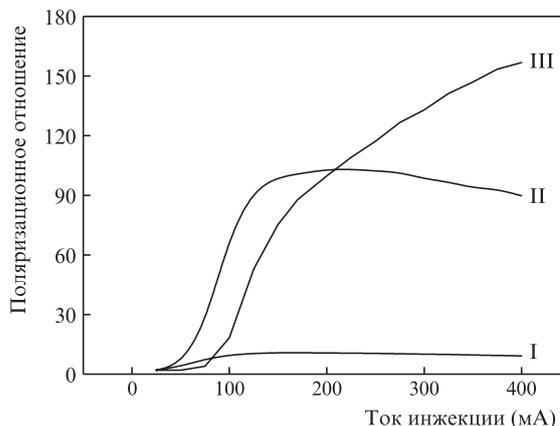


Рис.5. Зависимости поляризационного отношения TE/TM от тока инжекции для СЛД типов I, II и III при $L_a = 1500$ мкм и $T = 25^\circ\text{C}$.

составляет около 160, что соответствует степени поляризации 99%, и с ростом тока I продолжает расти.

Увеличение выходной оптической мощности, рост степени поляризации и сужение спектра излучения с ростом L_a при фиксированной плотности тока инжекции – общеизвестные явления для СЛД с колоколообразной формой спектра. Экспериментально обнаруженные аналогичные зависимости от числа узких квантовых ям в активном слое указывают на рост оптического усиления, сужение его спектра и увеличение разности между коэффициентами усиления волноводных TE и TM мод. Для детального описания этих процессов требуются дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Экспериментально изучены зависимости выходных характеристик СЛД от температуры в диапазоне 10–100°C. Как и следовало ожидать, при фиксированном токе инжекции медианная длина волны излучения λ_m с ростом температуры линейно смещается в длинноволновую область (0.3 нм/град.), что определяется изменением ширины запрещенной зоны в полупроводниковом активном слое. Полуширина спектра $\Delta\lambda$ при этом изменяется очень слабо – менее 0.06 нм/град. Поляризационное отношение излучения образцов СЛД типа II с $L_a = 1800$ мкм при уве-

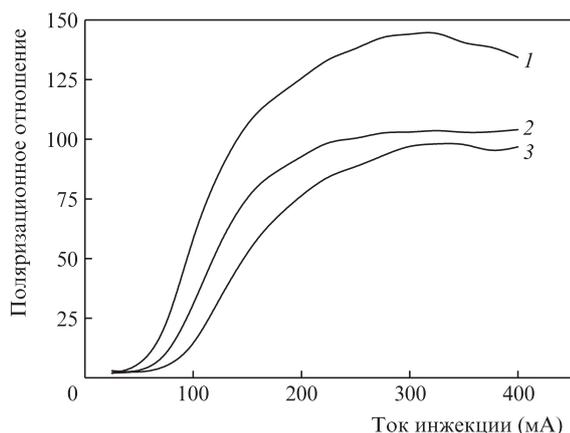


Рис.6. Зависимости поляризационного отношения TE/TM от тока инжекции при $T = 25$ (1), 40 (2) и 55°C (3) для СЛД типа III с $L_a = 1800$ мкм.

личении температуры с 25°C до 55°C падает приблизительно в полтора раза (рис.6). Параметром, наиболее чувствительным к рабочей температуре, является выходная оптическая мощность. Даже у «длинных» СЛД при фиксированном I увеличение температуры от 10°C до 70°C приводит к падению P_{FS} более чем на порядок. Это указывает на то, что для большинства практических применений светоизлучающих модулей на основе исследованных СЛД необходима термостабилизация активного элемента.

Предварительные ресурсные испытания СЛД в течение 1000 ч при комнатной температуре продемонстрировали их достаточно высокую надежность. Даже для об-

разцов с непрерывной выходной оптической мощностью 100 мВт оценка срока службы превышает 10000 ч.

4. Заключение

Сравнительное экспериментальное исследование кванторазмерных СЛД спектрального диапазона 770–790 нм, активные слои которых содержали одну, две или три симметрично расположенные тонкие квантовые ямы, показало, что при переходе от однослойных наноструктур к многослойным возрастает дифференциальная квантовая эффективность приборов, резко сужается спектр суперлюминесценции и ослабляется зависимость его ширины от уровня накачки, а также значительно возрастает степень поляризации выходного излучения. В частности, реализованы достаточно надежные пространственно одномодовые СЛД с рекордной спектральной плотностью более 12 мВт/нм и степенью поляризации 99%.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки РФ (Проект № 8.4853.2017/БЧ).

1. Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Кукушкин И.А., Ладугин М.А., Лапин П.И., Лобинцов А.А., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **41** (8), 677 (2011) [*Quantum Electron.*, **41** (8), 677 (2011)].
2. Ko T.H., Adler D.C., Fujimoto J.G., Mamedov D., Prokhorov V., Shidlovski V., Yakubovich S. *Opt. Express*, **12** (10), 2112 (2004).
3. Войтковский М., Лапин П.И., Мамедов Д.С., Фуджимото Дж.Дж., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **35** (7), 667 (2005) [*Quantum Electron.*, **35** (7), 667 (2005)].
4. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Ладугин М.А., Лапин П.И., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **43** (8), 751 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (8), 751 (2013)].