

Суперлюминесцентные диоды повышенной эффективности на основе гетероструктуры с квантовыми точками

Е.В.Андреева, П.И.Лапин, В.В.Прохоров, С.Д.Якубович

Показано, что оптимизация структуры активного канала суперлюминесцентных диодов (СЛД) спектрального диапазона 1100–1230 нм на основе InAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктуры с квантовыми точками позволяет заметно повысить их внешнюю квантовую эффективность. При выводе излучения через отрезок одномодового волоконного световода достигнута непрерывная выходная мощность 1.3 и 0.9 мВт при ширине спектра излучения 27 и 110 нм соответственно. Результаты предварительных ресурсных испытаний позволяют прогнозировать достаточно высокую надежность этих СЛД.

Ключевые слова: суперлюминесцентные диоды, эффективность излучения, квантовые точки.

1. Введение

В работе [1] приведены результаты исследований экспериментальных образцов суперлюминесцентных лазерных диодов (СЛД) на основе десятислойной гетероструктуры с квантовыми точками, успешно используемой для изготовления лазерных диодов (ЛД) [2–4]. Эти результаты представляют большой практический интерес, т. к. спектр излучения исследованных СЛД перекрывает полосу 1100–1230 нм, для которой серийно выпускаемые излучатели данного типа пока отсутствуют. К сожалению, по уровню выходной мощности рассматриваемые СЛД заметно уступают традиционным СЛД на основе двойных гетероструктур с отдельным ограничением носителей с «объемными» и квантоворазмерными активными слоями. Экспериментальные образцы имели гребневидный активный канал традиционной конфигурации [5]. В боковых областях толщина недотравленного слоя р-эмиттера составляла около 0.2 мкм. В работе [6] показано, что жесткое боковое ограничение (электронное и оптическое) за счет глубокого травления, формирующего гребень (вплоть до полного стравливания волноводного слоя), благоприятно сказывается на характеристиках лазерных диодов на основе аналогичной гетероструктуры с квантовыми точками: пороговая плотность тока снижается, а внешняя квантовая эффективность растет. В настоящей работе аналогичный подход был применен при изготовлении образцов СЛД, что позволило заметно повысить их эффективность. Особое внимание было уделено ресурсным испытаниям, ибо хорошо известно, что в случае традиционных ЛД и СЛД приближение активного канала к поверхности полупроводника может неблагоприятно сказаться на сроке службы диодов.

Е.В.Андреева, П.И.Лапин, В.В.Прохоров. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, п/я 70; e-mail: andreeva@superlumdiodes.com

С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 117454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 16 октября 2006 г.

2. Экспериментальные образцы

Сечение активного канала исследованных СЛД схематически изображено на рис.1. Он представляет собой одномодовый гребневидный волновод с десятью активными слоями на основе квантовых точек InAs. Как отмечалось выше, боковое растекание тока инжекции и боковое оптическое ограничение, определяемое скачком эффективного показателя преломления на краях гребня, сильно зависят от величины Δh – толщины недотравленного слоя, определяющей расстояние от поверхности полупроводника до верхней границы волноводного слоя. У образцов, исследованных в [1], $\Delta h = 0.2$ мкм. В настоящей работе были изготовлены и исследованы две партии образцов на основе той же гетероструктуры с $\Delta h = 0$ и 0.1 мкм. В первом случае слой р-эмиттера был полностью удален.

Использованный комплект фотолитографических шаблонов позволял изготавливать СЛД с длиной активного канала L_a до 1800 мкм. СЛД с максимальной длиной L_a обладали максимальной внешней квантовой эффективностью. Ниже приведены результаты сравнительного

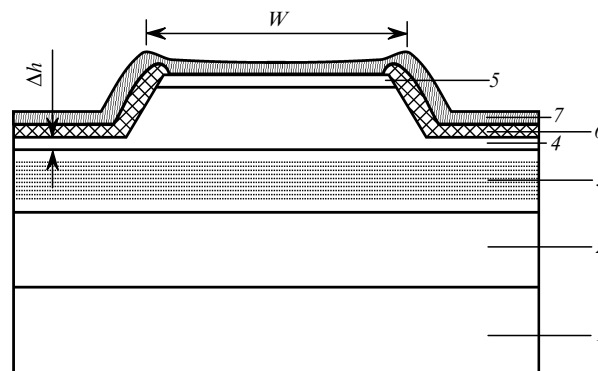


Рис.1. Сечение активного канала СЛД: 1 – подложка n^+ -GaAs; 2 – p -эмиттер GaAlAs; 3 – активный волновод, состоящий из 10 слоев квантовых точек InAs; 4 – p -эмиттер GaAlAs; 5 – контактный слой p^+ -GaAs; 6 – изолирующее покрытие; 7 – металлический контакт; ширина гребня $W = 4.0$ мкм.

анализа характеристик выходного излучения образцов СЛД с $\Delta h = 0, 0.1$ и 0.2 мкм.

3. Физические характеристики СЛД

На рис.2 представлены ватт-амперные характеристики выходного излучения СЛД в непрерывном режиме инжекции при стабилизированной температуре теплопроводов 12°C . Их анализ показывает, что уменьшение Δh с 0.2 до 0.1 мкм позволило значительно повысить внешнюю квантовую эффективность СЛД – наклон характеристики на участке развитой суперлюминесценции до начала теплового насыщения увеличился более чем в три раза. Дальнейшее уменьшение Δh мало изменило ватт-амперную характеристику излучения, выводимого в открытое пространство (рис.2,а). Внешняя эффективность незначительно увеличилась, однако тепловое насыщение стало проявляться при несколько меньшем токе инжекции I . Это свидетельствует о том, что выигрыш от увеличения бокового ограничения практически исчерпан, а условия теплоотвода от активного канала ухудшились.

Что касается ватт-амперной характеристики излучения, выводимого через отрезок одномодового волоконного световода (ОВС) (рис.2,б), то при уменьшении Δh от 0.1 мкм до нуля она существенно изменяется. Коэффициент ввода излучения в ОВС (Corning Pure Mode HI780 с числовой апертурой 0.14) падает от $53\% - 55\%$ до $33\% - 34\%$. Это объясняется тем, что с увеличением бокового оптического ограничения происходит «сжатие» волноводной моды в плоскости $p - p$ -перехода, что приводит к увеличению соответствующей дифракционной расходимо-

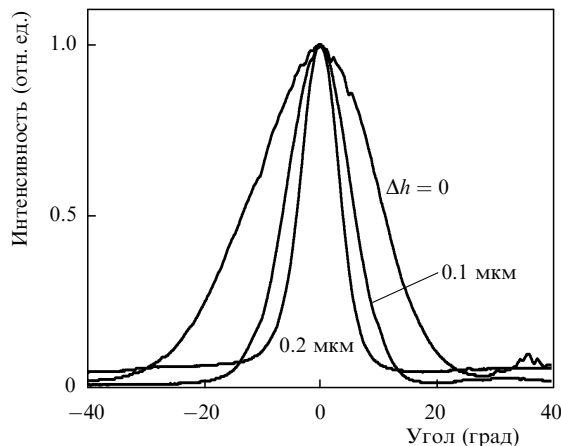
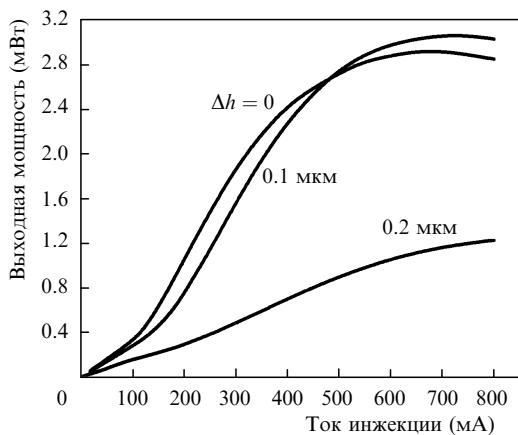


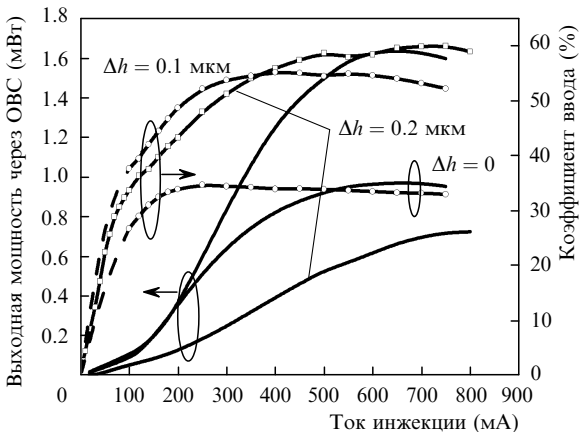
Рис.3. Угловое распределение интенсивности в плоскости $p - p$ -перехода в дальнем поле излучения для СЛД с $\Delta h = 0, 0.1$ и 0.2 мкм.

сти излучения диода (рис.3). Измерения проводились с использованием торцевой цилиндрической микролинзы на торце ОВС, которая эффективно фокусирует излучение в плоскости, перпендикулярной $p - p$ -переходу, тогда как в ортогональной плоскости захват излучения ограничен собственной числовой апертурой ОВС. В принципе коэффициент ввода можно увеличить путем использования отрезка нестандартного ОВС с большей числовой апертурой, однако это может сильно ограничить возможности практического использования соответствующих СЛД-модулей.

В работе [1] было показано, что спектры излучения СЛД на основе рассматриваемой гетероструктуры с из-

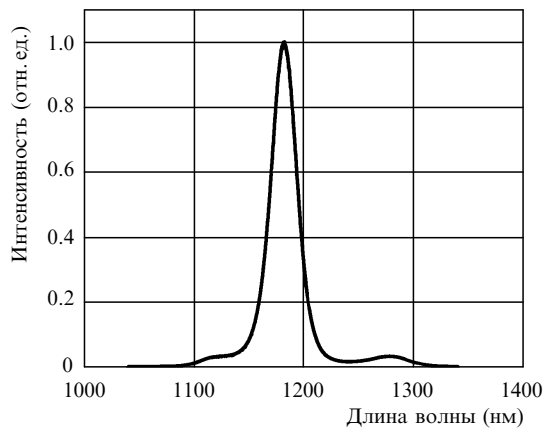


а

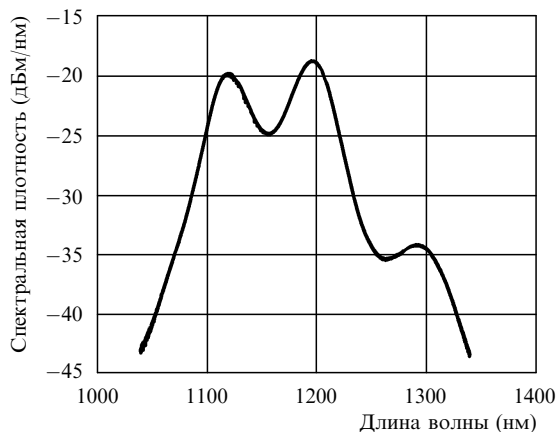


б

Рис.2. Ватт-амперные характеристики СЛД с $\Delta h = 0, 0.1$ и 0.2 мкм при выводе излучения в открытое пространство (а) и через ОВС (б).



а



б

Рис.4. Спектры выходного излучения СЛД с $\Delta h = 0.1$ мкм при $I = 450$ мА (а) и $\Delta h = 0$ при $I = 780$ мА (б).

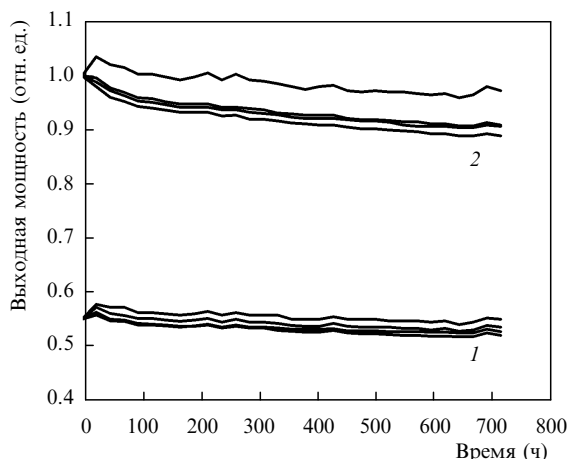


Рис.5. Хронограмма ресурсных испытаний СЛД с $L_a = 1600$ мкм при $I = 680$ мА (1) и $L_a = 1800$ мкм при $I = 780$ мА (2).

менением тока инжекции претерпевают достаточно сложную трансформацию, связанную с перераспределением интенсивностей квантовых переходов с основного и двух возбужденных состояний. В определенных условиях, сильно зависящих от длины активного канала L_a , спектр излучения может иметь практически колоколообразную («квазигауссову») форму с умеренной шириной линии. В других условиях он может быть существенно более широким с двумя или тремя спектральными максимумами. В последнем случае излучение характеризуется значительно меньшей длиной когерентности.

Для практических применений представляют интерес оба варианта спектра. При этом, как правило, желательно иметь максимальную выходную мощность. Среди образцов, исследованных в настоящей работе, максимальной выходной мощностью через отрезок ОВС P_{SM} обладали СЛД с $L_a = 1800$ мкм и $\Delta h = 0.1$ мкм. При токе инжекции $I \sim 450$ мА их выходная мощность через отрезок ОВС составляла около 1.3 мВт, а спектр излучения имел форму, представленную на рис.4,а. К сожалению, вплоть до полного теплового насыщения мощности в этих образцах не удалось достаточно выравнять спектральные максимумы, чтобы получить максимальную ширину спектра. Этого удалось достичь лишь для СЛД с $L_a = 1800$ мкм и $\Delta h = 0$. При токе инжекции $I = 780$ мА получена выходная мощность через ОВС $P_{SM} = 0.9$ мВт при ширине спектра (по уровню -3 дБ) 110 нм. При этом выходная мощность во внешнее пространство у этих СЛД составляла 2.5 и 2.9 мВт соответственно, что представ-

ляет практический интерес для СЛД-модулей с выводом излучения через плоское окно или коллимирующую линзу. Образцы СЛД с $\Delta h = 0$ и $L_a = 1600$ мкм имели максимальную ширину спектра излучения около 115 нм при $I = 680$ мА и $P_{SM} = 0.5$ мВт. Последние два типа образцов (с $\Delta h = 0$), как потенциально наиболее склонные к деградации, были подвергнуты ресурсным испытаниям в указанных рабочих режимах при стабилизированной температуре 25°C . Результаты этих испытаний представлены на рис.5. Их анализ в соответствии с общепринятым критерием позволяет прогнозировать срок службы СЛД: более 5000 ч при $L_a = 1600$ мкм и более 4000 ч при $L_a = 1800$ мкм. Такое время жизни приемлемо для большинства практических приложений.

4. Заключение

Оптимизация структуры активного канала СЛД на основе полупроводниковой гетероструктуры с квантовыми точками позволила значительно повысить их внешнюю квантовую эффективность. По сравнению с описанными в [1] прототипами СЛД-модулей, спектрально-широкополосными (SLD-541) или спектрально-узкополосными (SLD-551), получен более чем трехкратный выигрыш по выходной мощности.

Авторы признательны В.М.Устинову за полезные рекомендации и А.Т.Семенову за внимание к работе.

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ (проект РНП 2.1.1.1094).

1. Андреева Е.В., Жуков А.Е., Прохоров В.В., Устинов В.М., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (6), 527 (2006).
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., Lin G., Chi J. *Письма в ЖТФ*, **30** (1), 21 (2004).
5. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **33** (6), 471 (2003).
6. Ouyang D., Ledentsov N. N., Bimberg D., Kovsh A.R., Zhukov A.E., Mikhlin S.S., Ustinov V.M. *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, L53 (2003).