

# Мощные суперлюминесцентные диоды с неинжектируемыми выходными секциями

П.А.Лобинцов, Д.С.Мамедов, В.В.Прохоров, А.Т.Семенов, С.Д.Якубович

*Исследованы суперлюминесцентные диоды в спектральной области 850 нм на основе (GaAl)As-гетероструктуры с разделным ограничением. На выходных участках узкого активного канала шириной 4 мкм контактный слой  $p^+$ -GaAs был удален, а металлический контакт не наносился. Эти участки выполняли функцию насыщающихся поглотителей. Использование такой конструкции позволило значительно повысить порог катастрофической деградации и получить непрерывную выходную мощность с торца 250 мВт. Мощность, выводимая через отрезок одномодового волоконного световода при простейшем методе стыковки, достигала 110 мВт.*

**Ключевые слова:** суперлюминесцентный диод, насыщающийся поглотитель, катастрофическая деградация.

## 1. Введение

При создании мощных суперлюминесцентных диодов (СЛД) и полупроводниковых лазерных усилителей (ПЛУ) бегущей волны часто используются конструкции с клиновидным активным каналом [1–5]. Они позволяют получить выходную мощность порядка сотен милливатт и даже единиц ватт с одного активного элемента при дифракционной расходимости излучения. Во многих технических применениях требуется, чтобы вывод излучения СЛД осуществлялся через одномодовый волоконный световод. Для указанных выше излучателей это является сложной технической проблемой, т. к. ширина активного канала в выходном сечении существенно превышает диаметр моды волокна. Многолинзовые микрообъективы, позволяющие решить эту задачу [6, 7], сложны в изготовлении и, кроме того, их использование сильно усложняет процесс стыковки. Главным образом по этой причине мощные СЛД- и ПЛУ-модули с одномодовым оптоволоконным выходом являются весьма дорогостоящими и находят ограниченное применение.

Целью настоящей работы было получение максимальной выходной мощности в непрерывном режиме работы СЛД с узким ( $w = 3 - 5$  мкм) активным каналом. Для таких излучателей достаточно эффективная стыковка с одномодовым волокном (ввод около 50 % мощности) обеспечивается относительно просто благодаря использованию микролинзы на торце волоконного световода. Основным фактором, ограничивающим выходную мощность СЛД, является катастрофическая деградация – резкий спад выходной мощности. Выходная плотность мощности, соответствующая порогу деграда-

ции, у СЛД заметно ниже, чем у диодных лазеров, созданных на основе той же гетероструктуры и при одинаковых конфигурациях активных каналов. Это связано с тем, что из-за подавления положительной обратной связи в СЛД их внешняя квантовая эффективность меньше, чем у лазеров, поэтому в СЛД тот же уровень выходной мощности достигается при большем рабочем токе и большем разогреве активного элемента. Кроме того, распределение плотности фотонов и плотности тока инжекции вдоль активного канала в СЛД более неоднородно, чем в диодных лазерах. В однопроходном СЛД с однородным активным каналом это распределение минимально в его средней части и максимально на выходных гранях. Аналогичное распределение имеет и температурное поле в кристалле СЛД.

Если для определенности рассмотреть излучатели спектрального диапазона 800–850 нм на основе (GaAl)As-гетероструктур, то у лучших образцов диодных лазеров в непрерывном режиме порог катастрофической деградации наблюдается при плотности мощности излучения более  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, тогда как у лучших СЛД традиционной конфигурации порог имеет место при  $(2 - 3) \times 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Многие фирмы серийно выпускают пространственно-одномодовые «узкоканальные» лазеры с выходной мощностью с торца 200 мВт. Для СЛД рекордный лабораторный результат – 105 мВт в открытом пространстве в непрерывном режиме – был получен в работе [8]. Среди серийно выпускаемых СЛД рекордной выходной мощностью обладает, по-видимому, модель SLD38-NP: 50 мВт с торца и 20 мВт через одномодовое волокно.

Исследованные в настоящей работе трехсекционные СЛД с неинжектируемыми выходными секциями имеют повышенный порог катастрофической деградации, что позволило получить рекордные выходные характеристики для приборов данного типа.

## 2. Экспериментальные образцы

Для изготовления экспериментальных СЛД (рис.1) была использована стандартная объемная (GaAl)As-ге-

П.А.Лобинцов, Д.С.Мамедов, В.В.Прохоров, А.Т.Семенов. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, В-454, п/я 70; e-mail: vrokhov@rambler.ru

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

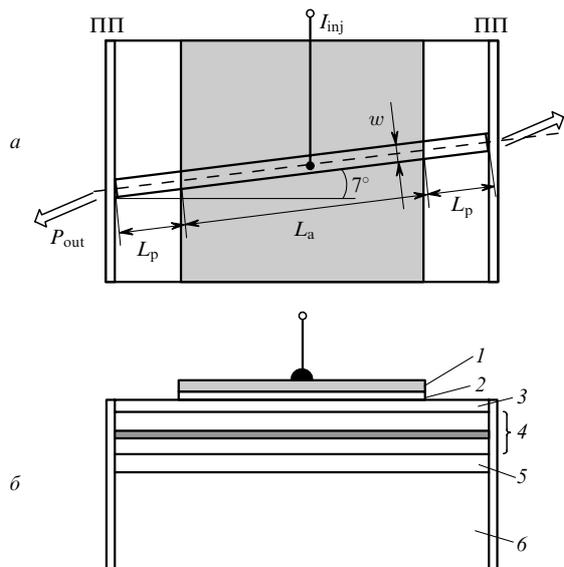


Рис.1. Конфигурация трехсекционного СЛД – вид с *p*-стороны (плоскость [100]) (а) и сечение вдоль оси активного канала (б): 1 – металлический контакт; 2 – контактный слой *p*<sup>+</sup>-GaAs; 3 – *p*-эмиттер; 4 – трехслойный активный волновод (не легирован); 5 – *n*-эмиттер; 6 – *n*-подложка.

тероструктура с раздельным ограничением носителей, на основе которой серийно изготавливаются приборы SLD38-HP. Боковое ограничение обеспечивалось гребневидной структурой шириной *w* = 4 мкм. Ось активного канала была наклонена под углом 7° относительно нормали к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены диэлектрические просветляющие покрытия (ПП). В отличие от серийных приборов, имеющих однородный омический контакт вдоль всего активного канала, у исследованных СЛД инжекция носителей производилась только в среднюю часть активного канала длиной *L<sub>a</sub>* = 1000 мкм. На участках длиной *L<sub>p</sub>*, прилегающих к выходным граням, фотолитографическим методом был удален сильнолегированный контактный слой *p*<sup>+</sup>-GaAs, а металлизация поверхности не проводилась.

Исследовались два типа образцов с длинами неинжектируемых выходных секций *L<sub>p</sub>*<sup>(1)</sup> = 100 мкм и *L<sub>p</sub>*<sup>(2)</sup> = 200 мкм. Эти секции выполняли функцию насыщающихся поглотителей. В многосекционных диодных лазерах [9] участки, выполняющие аналогичную функцию, обычно имеют контакты, обладающие уткой или короткозамкнутые на *N*-контакт. Их использование позволяет получить различные специфические режимы генерации, однако значительно повышает порог и снижает внешнюю эффективность по сравнению с аналогичным лазером с однородной инжекцией. По замыслу настоящей работы использование описанных выше легко просветляющихся поглотителей должно (несмотря на некоторое снижение внешней квантовой эффективности) уменьшить перегрев выходных участков СЛД и повысить порог катастрофической деградации, а следовательно, достижимый уровень выходной мощности.

### 3. Выходные характеристики трехсекционных СЛД

На рис.2 представлены характерные ватт-амперные характеристики исследованных СЛД двух типов, зарегистри-

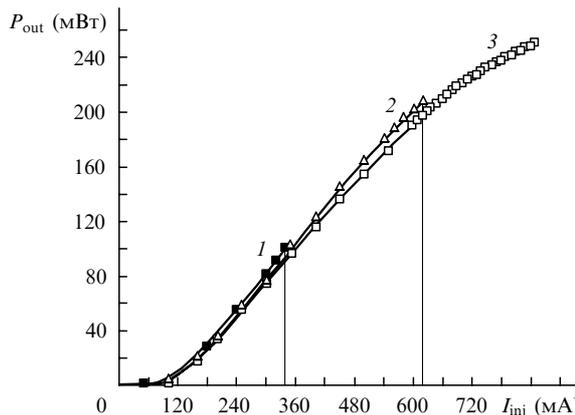


Рис.2. Ватт-амперные характеристики стандартного односекционного СЛД (*L<sub>a</sub>* = 1000 мкм, *L<sub>p</sub>* = 0) (1) и трехсекционных СЛД типов I (*L<sub>p</sub>*<sup>(1)</sup> = 100 мкм) (2) и II (*L<sub>p</sub>*<sup>(2)</sup> = 200 мкм) (3).

стрированные в непрерывном режиме инжекции в условиях термостабилизации при температуре 25 °С. Для сравнения здесь же приведена ватт-амперная характеристика (кривая 1) односекционного СЛД традиционной конфигурации (*L<sub>p</sub>* = 0) с такой же длиной активного канала (*L<sub>a</sub>* = 1000 мкм) и изготовленного из той же гетероэпитаксиальной пластины, что и трехсекционные СЛД. Катастрофическая деградация односекционного СЛД наблюдалась при мощности 90–100 мВт, что соответствует плотности светового потока на выходном торце активного канала (2.2 – 2.5) × 10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Трехсекционные СЛД типа I (*L<sub>p</sub>*<sup>(1)</sup> = 100 мкм) испытывали катастрофическую деградацию при выходной мощности, приблизительно в два раза большей. У трехсекционных СЛД типа II (*L<sub>p</sub>*<sup>(2)</sup> = 200 мкм) при токах инжекции до 850 мА (их значение ограничивалось источником тока накачки) и выходной мощности до 250 мВт (плотность мощности до 6.2 × 10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup>) катастрофическая деградация отсутствовала. В ходе измерений не наблюдалось также медленного изменения выходной мощности при фиксированном токе инжекции.

Следует отметить, что ввиду полной симметричности этих излучателей суммарная выходная мощность с обоих торцов в открытое пространство достигала 0.5 Вт, а усредненная дифференциальная внешняя эффективность составляла около 0.7 Вт/А, что близко к соответствующему значению для мощных одномодовых диодных лазеров.

Выходное излучение СЛД вводилось в отрезок одномодового волоконного световода Corning Pure Mode HI 780 через торцевую цилиндрическую линзу. Достигнутый коэффициент ввода составил около 47 %, что позволило получить мощность на выходе одномодового волокна более 100 мВт. По нашим сведениям, это рекордное значение для приборов данного класса. Ватт-амперная характеристика СЛД с оптоволоконным выходом изображена на рис.3. Дальнее поле излучения имело характерное для СЛД данного типа серповидное сечение пучка с расходимостью по полуширине 8.0° в плоскости *p* – *n*-перехода и 40.5° в ортогональной плоскости (рис.4), что соответствует дифракционным пределам.

Спектры излучения СЛД при максимальной выходной мощности представлены на рис.5. Спектр, зарегистрированный на выходе одномодового волокна, имеет меньшую ширину и более глубокую периодическую мо-

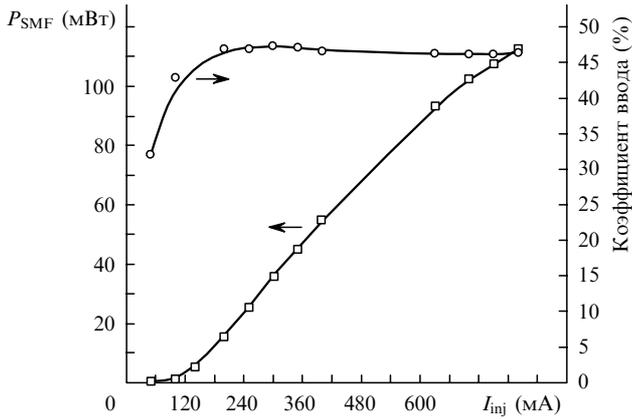


Рис.3. Зависимость коэффициента ввода излучения в одномодовый световод от тока инжекции и ватт-амперная характеристика СЛД типа II с одномодовым волоконным выходом.

дуляцию модами резонатора Фабри – Перо. Это обусловлено наличием паразитной обратной связи из-за отражения на волоконной микролинзе. В случае излучения СЛД в открытое пространство (кривая 1) глубина модуляции не превышала 3%, а при выводе излучения через волокно она достигала 10% – 15%. Этот параметр очень важен для многих практических применений СЛД. При

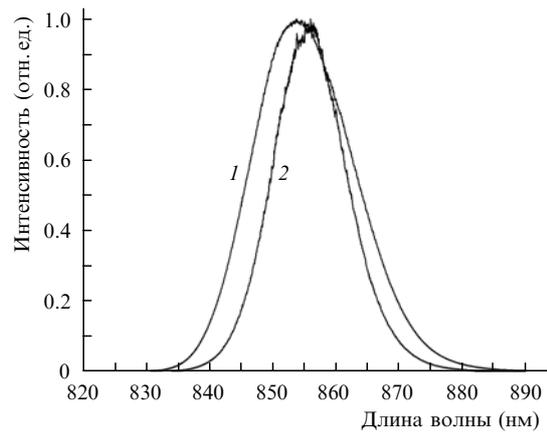


Рис.5. Спектры выходного излучения СЛД типа II в открытое пространство (1) и через отрезок одномодового световода (2). Ток инжекции 850 мА.

изготовлении СЛД-модулей с оптоволоконным выходом для снижения глубины модуляции спектра следует использовать микролинзы с просветляющим покрытием.

Для мощных СЛД, работающих при экстремально высоких токовых, лучевых и тепловых нагрузках, проблема надежности весьма критична. Полномасштабное исследование их рабочего ресурса требует продолжительного времени и большой статистики испытаний. В рамках данной работы для предварительной оценки надежности две партии по шесть образцов СЛД типов I и II проработали 288 ч при температуре 25 °С и постоянном токе инжекции 360 мА, выходная мощность в открытое пространство составляла при этом около 100 мВт. СЛД типа I этих испытаний не выдержали – спад выходной мощности превысил 50%. Что касается СЛД типа II, то четыре из шести образцов успешно прошли испытания (рис. 6). Можно уверенно прогнозировать, что срок службы таких излучателей составит более 1000 ч, что приемлемо для ряда технических применений. На их основе могут быть созданы светоизлучающие модули с одномодовым волоконным выходом и мощностью 40 – 50 мВт. Это потребует специальной конструкторской проработки в части использования корпуса с лучшим теплоотводом и термоэлектрического микроохлаждителя большей производительности по сравнению с теми, которые при-

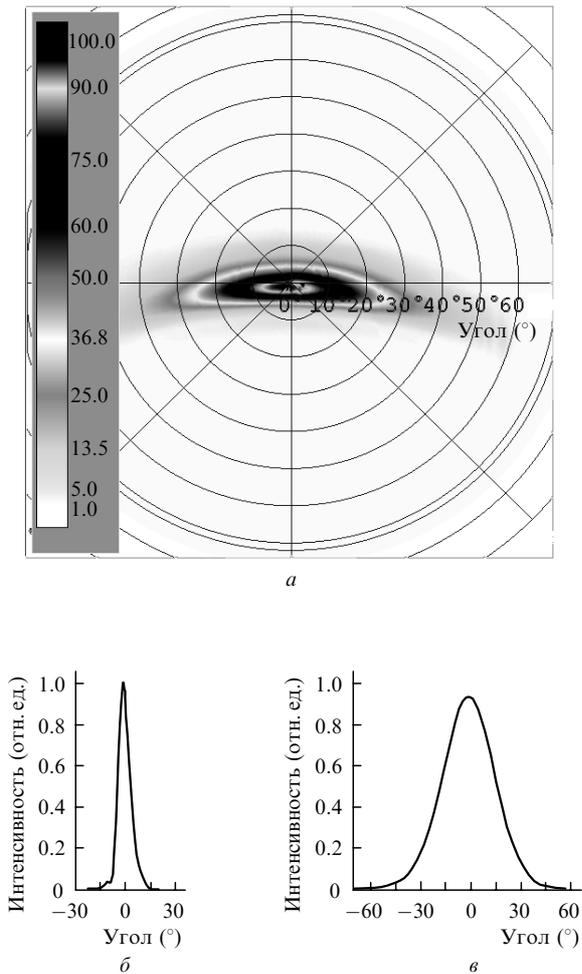


Рис.4. Дальнее поле излучения: сечение выходного пучка (а), а также угловые распределения интенсивности в плоскости  $p - n$ -перехода (б) и в ортогональной плоскости (в).

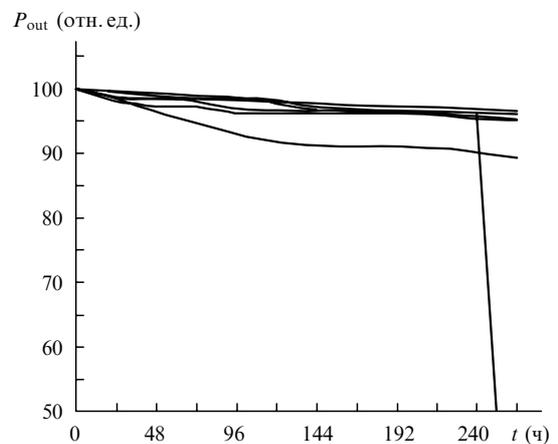


Рис.6. Наробotka партии из шести СЛД типа II при токе инжекции  $I_{inj} = 360$  мА и температуре  $T = 25$  °С.

меняются в серийных СЛД-модулях с выходной мощностью порядка 10 мВт.

В заключение отметим, что конструкция описанных СЛД позволяет использовать их в качестве оптических усилителей бегущей волны. При подаче на вход такого устройства спектрально-согласованного сигнала достаточной мощности происходит сильное пространственное перераспределение фотонных полей. В результате при том же токе инжекции усилитель может обеспечить больший уровень выходной мощности, чем СЛД в режиме суперлюминесценции. Известная D2-линия Cs практически попадает в максимум оптического усиления исследованных приборов, поэтому они представляют особый интерес для спектроскопии и, в частности, для экспериментов по охлаждению атомных ансамблей [10].

Работа частично поддержана грантом МНТЦ № 2651Р.

1. Coldberg L., Mehuys D. *Electron. Lett.*, **30**, 1682 (1994).
2. Liu Y. et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, 4009 (2001).
3. Yamatiya T. et al. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L678 (2001).
4. Alphonse G.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4648**, 125 (2002).
5. Андреева Е.В., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **32**, 112 (2002).
6. Delepine S. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **7**, 111 (2001).
7. Delepine S. et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 254 (2000).
8. Takayama T. et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 1981 (1996).
9. Батоврин В.К., Семенов А.Т., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23**, 125 (1996).
10. Ривлин Л.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **30**, 1027 (2000).