

# Широкополосные источники излучения высокой яркости на основе суперлюминесцентного диода и полупроводникового лазерного усилителя

В.В.Прохоров, Д.С.Шваков, С.Д.Якубович

*Экспериментально показано, что использование полупроводникового лазерного усилителя (ПЛУ) бегущей волны позволяет значительно улучшить выходные характеристики суперлюминесцентного диода, в частности повысить выходную оптическую мощность или расширить спектральную полосу излучения. При использовании излучающих в спектральной области 1300 нм ПЛУ, выполненных на основе двухсторонних (InGa)PAs-гетероструктур с отдельным ограничением, и различных СЛД в качестве источников входного сигнала получена непрерывная мощность до 50 мВт на выходе одномодового волоконного световода и спектральная полуширина линии излучения до 70 нм.*

**Ключевые слова:** суперлюминесцентный диод, полупроводниковый лазерный усилитель.

## 1. Введение

Суперлюминесцентные диоды (СЛД), совмещающие в себе высокую яркость полупроводниковых лазеров и широкий спектр излучения светоизлучающих диодов, являются оптимальными источниками излучения для оптической когерентной томографии (ОКТ), оптической метрологии и многих типов оптических сенсоров. Для некоторых практических применений требуются СЛД-модули с оптоволоконным выходом и максимально достижимой непрерывной выходной мощностью  $P$ . Среди серийно выпускаемых СЛД-модулей, излучающих в спектральной области 1300 нм, максимальной выходной мощностью  $P \approx 20$  мВт обладают приборы фирм EXALOS, COVEGA, InPhenix и некоторых других. Гораздо более высокий уровень выходной мощности (до нескольких сотен милливатт) может быть получен при использовании СЛД с клиновидным активным каналом или системы, состоящей из обычного СЛД и полупроводникового лазерного усилителя (ПЛУ) с клиновидным активным каналом [1–3]. Однако ввод излучения таких источников в одномодовый волоконный световод (ОВС) является сложной проблемой, сопряженной с большими затратами.

В настоящей работе исследуется (InGa)PAs-ПЛУ бегущей волны с узким активным каналом, обеспечивающим высокоэффективный ввод излучения в ОВС. Основные цели работы – получение максимальной мощности для системы СЛД + ПЛУ и уширение спектра выходного излучения ПЛУ при использовании его в качестве смесителя собственного суперлюминесцентного излуче-

ния и входного излучения СЛД со спектром, смещенным в длинноволновую сторону.

## 2. Экспериментальные результаты

Экспериментальный ПЛУ-модуль с входным и выходным ОВС типа SMF-28 был собран в корпусе Butterfly. При изготовлении активного элемента использовалась двухсторонняя гетероструктура с отдельным ограничением, выращенная методом газотранспортной эпитаксии из металлоорганических соединений (InGa)PAs/InP, с максимумом линии суперлюминесценции вблизи  $\lambda = 1280$  нм. Активный канал ПЛУ представлял собой прямой гребневидный волновод шириной 4 мкм, сформированный методом химического травления через фотолитографическую маску. Угол между его осью и нормалью к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены антиотражающие покрытия, составлял  $7^\circ$ . Длина активного канала была равна 1000 мкм. Такая конструкция обеспечивала надежное подавление положительной оптической обратной связи (даже при максимальных уровнях накачки остаточная спектральная модуляция модами Фабри–Перо не превышала 5%). Кристалл напаялся на медный теплопровод и на термоэлектрический микроохладитель р-стороной вверх. В качестве датчика температуры использовался терморезистор, находящийся в тепловом контакте с теплопроводом. Конструкция модуля обеспечивала термостабилизацию активного элемента в широком диапазоне внешних температур при рассеиваемой мощности до 1 Вт.

В эксперименте, направленном на получение максимальной мощности в системе СЛД + ПЛУ, в качестве источника входного сигнала использовался серийный модуль SLD-561-HP2 с выходным ОВС и активным элементом на основе той же полупроводниковой гетероструктуры. Его излучение могло попадать на вход ПЛУ непосредственно после сварки его выходного ОВС с входным ОВС усилителя или через широкополосный оптоволоконный изолятор, предотвращающий попадание суперлюминесценции ПЛУ в активный канал СЛД. На

**В.В.Прохоров, Д.С.Шваков.** ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, п/я 70;

e-mail: prokhorov@superlumdiodes.com; Svakov@list.ru

**С.Д.Якубович.** Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78;

e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 14 марта 2005 г.

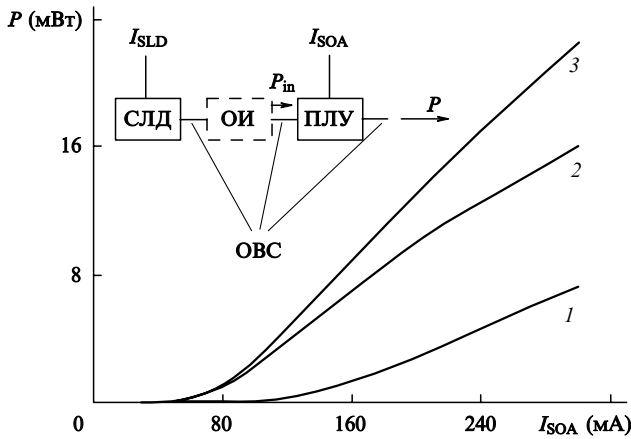


Рис.1. Ватт-амперные характеристики ПЛУ без входного сигнала ( $I_{SLD} = 0, P_{in} = 0$ ) (1), системы СЛД + ПЛУ без ОИ ( $I_{SLD} = 300$  мА,  $P_{in} = 8$  мВт при  $I_{SOA} = 0$ ) (2) и системы СЛД + ОИ + ПЛУ ( $P_{in} = 7.6$  мВт = const) (3) при  $T = 20$  °С;  $I_{SLD}$  и  $I_{SOA}$  – токи накачки СЛД и ПЛУ.

рис.1 представлены ватт-амперные характеристики ПЛУ без входного сигнала и при наличии входного сигнала, поступающего на вход ПЛУ непосредственно и через оптический изолятор. Эти кривые показывают, что система СЛД + ПЛУ позволяет получить значительный выигрыш в квантовой эффективности, особенно при использовании оптического изолятора (ОИ), предотвращающего подавление входного сигнала встречным излучением ПЛУ.

Передачные характеристики ПЛУ при различных токах накачки  $I_{SOA}$  в зависимости от мощности входного сигнала  $P_{in}$  (рис.2) показывают, что этот ПЛУ представляет несомненный интерес для оптоволоконных линий связи, т.к. обеспечивает для малых сигналов «чистое» (из ОВС в ОВС) усиление, превышающее 20 дБ. Рекордное значение  $P \approx 50$  мВт было получено в условиях глубокого насыщения оптического усиления при  $T = 12$  °С,  $I_{SOA} = 600$  мА,  $I_{SLD} = 300$  мА,  $P_{in} = 7.5$  мВт. Соответствующие спектры излучения СЛД, ПЛУ и системы СЛД + ОИ + ПЛУ представлены на рис.3. Полуширина результирующего спектра составляет 26 нм (несколько «обужена» по сравнению с полуширинами спектров СЛД и ПЛУ), а центральная длина волны 1296 нм смещена в длинноволновую область, соответствующую максимуму оптического усиления ПЛУ.

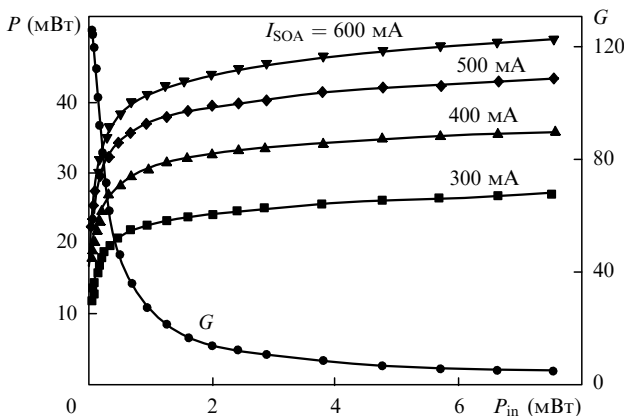


Рис.2. Передачные характеристики ПЛУ при различных токах инжекции  $I_{SOA}$  и его коэффициент оптического усиления  $G$  при  $I_{SOA} = 600$  мА ( $T = 12$  °С).

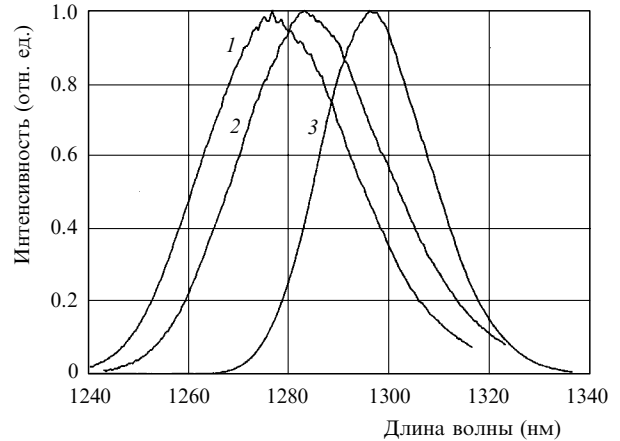


Рис.3. Спектр излучения ПЛУ в отсутствие входного сигнала (1), спектр излучения входного СЛД (2) и спектр выходного излучения системы СЛД + ОИ + ПЛУ (3) при  $T = 12$  °С,  $I_{SLD} = 300$  мА,  $P_{in} = 7.6$  мВт,  $I_{SOA} = 600$  мА,  $P = 49$  мВт.

Во втором эксперименте серийный модуль SLD-561-HP1 с центральной длиной волны излучения вблизи 1320 нм был использован как источник входного сигнала. Его спектральная полоса соответствовала области прозрачности ПЛУ, вследствие чего излучение проходило сквозь активный канал ПЛУ без усиления, с небольшими диссипативными потерями. При накачке ПЛУ его собственное более коротковолновое суперлюминесцентное излучение добавлялось к излучению входного СЛД, формируя на выходе широкий комбинированный спектр. Фор-

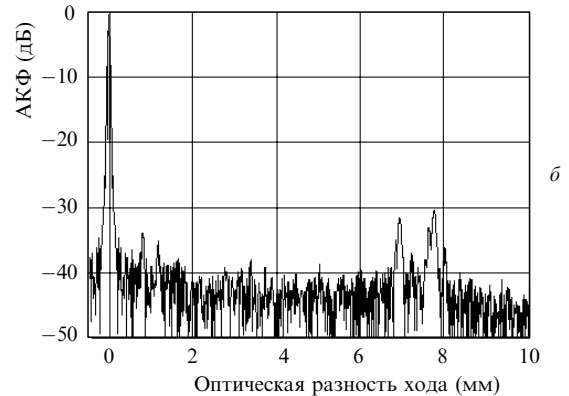
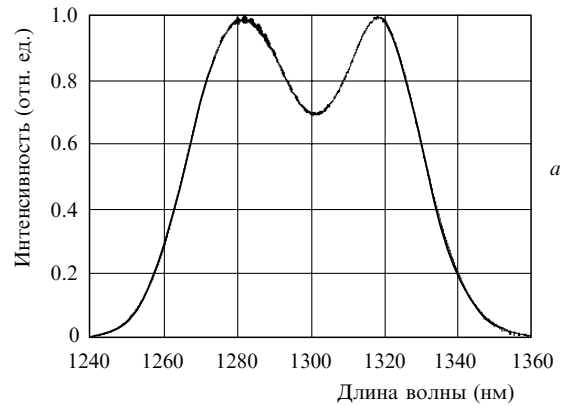


Рис.4. Спектр выходного излучения ПЛУ, выполняющего роль смесителя собственного суперлюминесцентного излучения и входного излучения СЛД с полосой излучения, смещенной в длинноволновую область спектра при  $T_{SLD} = 30$  °С,  $I_{SLD} = 193$  мА,  $T_{SOA} = 15$  °С,  $I_{SOA} = 300$  мА,  $P \approx 10$  мВт (а), и АКФ комбинированного излучения (б).

ма этого спектра (соотношение спектральных максимумов, провал между ними, полная ширина) может изменяться в некоторых пределах вследствие изменения накачки и температур входного СЛД и ПЛУ. Такая конструкция несколько проще обычно используемой в широкополосных источниках излучения на основе СЛД, предназначенных для ОКТ, где с целью суммирования излучения двух или более СЛД-модулей применяются широкополосные ОВС-разветвители [4, 5]. На рис.4 показана одна из реализаций комбинированного спектра с выровненными спектральными максимумами, соответствующая  $P \approx 10$  мВт, и автокорреляционная функция (АКФ) интенсивности такого источника излучения. Ее полуширина, определяющая длину когерентности излучения, составляет 26 мкм.

Таким образом, в настоящей работе показано, что применение ПЛУ позволяет заметно увеличить как выходную оптическую мощность, так и спектральную по-

лосу излучения источников света на основе СЛД. В частности, мощность  $P = 50$  мВт является, по нашим сведениям, рекордной для соответствующих источников, излучающих в спектральной области 1300 нм.

Авторы выражают признательность А.Т.Семенову за внимание к работе. Работа частично поддержана грантом МНТЦ № 2651Р.

1. Yamatoya T., Mori S., Koyama F., Iga K. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 5121 (1999).
2. Yamatoya T., Sekiguchi S., Koyama F., Iga K. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L678 (2001).
3. Donnelly J.P., Walpole J.N., Betts G.E., Groves S.H., Woodhouse J.P., O'Donnell F.J., Missagia L.J., Bailey R.J., Napoleone A. *IEEE Photon.Tech.Lett.*, **8** (11), 1450 (1996).
4. Ко Т.Н., Adler D.C., Fujimoto J.G., Mamedov D., Prokhorov V., Shidlovski V., Yakubovich S. *Opt.Express*, **12** (10), 2112 (2004).
5. Адлер Д.С., Ко Т.Х., Конорев А.К., Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Фуджимото Д.Д., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **34** (10), 915 (2004).