

# Полупроводниковые оптические усилители для спектрального диапазона 1000–1100 нм

А.А.Лобинцов, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович

*Исследованы два типа полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) на основе двухслойной квантоворазмерной гетероструктуры в системе  $(\text{InGa})\text{As}/(\text{GaAl})\text{As}/\text{GaAs}$ . В ПОУ-модулях с входными и выходными одномодовыми волоконными световодами на длине волны 1060 нм достигнут коэффициент оптического усиления более 30 дБ и уровень насыщения выходной мощности более 30 мВт. При использовании этих ПОУ в качестве активных элементов перестраиваемого лазера осуществлена скоростная непрерывная спектральная перестройка до 85 нм при выходной мощности 0.5 мВт и до 45 нм при мощности более 30 мВт.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазерный усилитель, полупроводниковая квантоворазмерная гетероструктура, перестраиваемый лазер.

## 1. Введение

Исследование полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) началось вскоре после создания полупроводниковых лазеров [1, 2]. Для реализации ПОУ были разработаны различные методы подавления положительной оптической обратной связи в лазерных диодах. В настоящее время используются, главным образом, конструкции с узким (прямым или изогнутым) волноводным активным каналом, ось которого наклонена к торцевым граням кристалла, на которые нанесены просветляющие покрытия. В режиме усиления собственного спонтанного излучения ПОУ выделились в самостоятельный класс полупроводниковых источников излучения – суперлюминесцентные диоды (СЛД) [3].

ПОУ телекоммуникационного диапазона спектра (1300–1650 нм) нашли широкое применение в различных узлах волоконно-оптических систем передачи информации в качестве как усилителей, так и модуляторов и коммутаторов оптических сигналов. Фирмы COVEGA, InPhenix, DensLight и др. серийно выпускают широкую гамму приборов этого класса. Что касается «коротковолновых» ПОУ, то они чаще служат активными элементами одночастотных и перестраиваемых лазеров с внешними резонаторами, содержащими те или иные спектрально-селективные элементы [4–6].

В последнее десятилетие бурно развивается оптическая когерентная томография (ОКТ) – методика получения *in vivo* изображений биологических тканей с пространственным разрешением до единиц микрон [7]. В различных системах ОКТ используются либо широкополосные (низкокогерентные) источники непрерывного излу-

чения (чаще всего СЛД), либо быстроперестраиваемые по длине волны лазеры. Наиболее широкое применение ОКТ-системы нашли в офтальмологической диагностике [8, 9], где обычно используются источники света ближнего ИК диапазона спектра (800–900 нм), соответствующего минимуму оптического поглощения глазной жидкостью, и скоростные спектрометры с ПЗС-линейками в качестве приемников интерференционного сигнала. В 2006 г. несколько фирм (Optopol Technology, Topcon Medical Systems, OPTOVUE и др.) начали серийный выпуск диагностической аппаратуры указанного типа.

Наряду с этим в последние годы все больший интерес для офтальмологической диагностики представляют источники излучения спектрального диапазона 1000–1100 нм. Это излучение глубже проникает в глазное дно и, как показано в ряде работ (см., напр., [10]), позволяет получить больше информации о некоторых патологиях глаза. В полосе 1040–1060 нм имеется второе окно прозрачности глазной жидкости. И хотя оптическое поглощение в нем заметно выше, чем в ближнем ИК диапазоне, этот «минус» может быть скомпенсирован увеличением экспозиции, т. к. допустимые безопасные для глаза дозы облучения в указанной полосе значительно выше. К сожалению, достаточно эффективные фотоприемные ПЗС-линейки для этой полосы спектра пока отсутствуют, поэтому приходится использовать схему ОКТ с одиночным фотоприемником и спектрально-свицирующим лазером в качестве источника излучения. Такие лазеры могут быть созданы на основе оптического волокна, активированного ионами иттербия [11]. Однако схемы перестраиваемых лазеров на основе ПОУ предпочтительнее из-за их более высокой эффективности. По оценкам специалистов фирмы Micron Optics, выпускающей подобные лазеры с использованием оригинальных перестраиваемых волоконных фильтров Фабри – Перо (FTFF), для реализации лазера, который будет востребован в ОКТ, требуется ПОУ-модуль диапазона 1040–1060 нм с уровнем насыщения выходной мощности не менее 30 мВт. По нашим сведениям, в настоящее время на оптоэлектронном рынке для этой полосы представлена единственная

А.А.Лобинцов, М.В.Шраменко. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, п/я 70;  
e-mail: shramenko@superlumdiodes.com, Lik\_Besss@rambler.ru  
С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники (технический университет), Россия, 117454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

модель ПОУ, а именно QSOA-1050 производства QPHO-TONICS с коэффициентом оптического усиления до 20 дБ и с насыщением выходной мощности на уровне 10 мВт. Таким образом, разработка подобных ПОУ с повышенной эффективностью является весьма актуальной. Этой проблеме и посвящена настоящая работа.

## 2. Экспериментальные образцы

Исследованные образцы ПОУ были изготовлены на основе двухслойной квантоворазмерной гетероструктуры (ДКРС) в системе (InGa)As/(GaAl)As/GaAs, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии [12]. Конструкция двухпроходного ПОУ типа I подробно описана в [5]. Его однопроходный активный канал длиной 600 мкм имел изогнутую J-образную форму. Ось активного канала была наклонена на  $7^\circ$  по отношению к нормали к выходной грани кристалла и была ортогональна задней грани. На выходную грань наносилось просветляющее покрытие (ПП), обеспечивающее остаточный эффективный коэффициент отражения менее  $10^{-4}$ , а на заднюю грань – отражающее покрытие (ОП) с коэффициентом отражения 3%. ПОУ типа II имел конструкцию, традиционную для однопроходных усилителей. Его прямой активный канал длиной 1600 мкм был наклонен на  $7^\circ$  к обоим торцевым граням кристалла с нанесенными ПП (см. врезки на рис.1). Образцы были собраны в корпусах типа Butterfly с термоэлектрическими микроохлаждателями и термисторами для обеспечения термостабилизации в рабочих режимах. Отрезки сохраняющего поляризацию оптоволокна типа Corning PANDA использовались в качестве входных/выходных ОВС. Модули типов I и II имели соответственно один или два ОВС. В стыковочных узлах «медленная» ось ОВС располагалась параллельно гетерослоям диодов.

В отсутствие оптической обратной связи (при скошенных выходных торцах ОВС) ПОУ-модули обладают характеристиками СЛД. Глубина остаточной модуляции спектра модами Фабри – Перо у модулей типов I и II не превышала 5% и 2% соответственно. Скалывание вы-

ходных торцов ОВС нормально к оси превращает ПОУ-модули в лазеры с внешним неселективным оптоволоконным резонатором. Типичные мощностные и спектральные характеристики экспериментальных образцов в суперлюминесцентном и лазерном режимах представлены на рис.1.

## 3. Результаты экспериментов

В настоящей работе ПОУ типа I со скромными мощностными характеристиками выполнял вспомогательную функцию. На его основе был собран лабораторный макет полупроводникового лазера с акустооптическим перестраиваемым фильтром (АОПФ) во внешнем оптоволоконном резонаторе. С использованием этого лазера были проведены исследования передаточных характеристик высокоэффективного ПОУ типа II. Аналогичный лазер спектрального диапазона 820–870 нм, подробно описанный в [5], отличался от макета только активным элементом: модуль SOA-371 был заменен на ПОУ типа I. Оптическая схема лазера представлена на рис.2,а. Входящие в нее АОПФ 2 и оптоволоконные коллиматоры 3 были просветлены на вышеуказанный спектральный диапазон, а в диапазоне 1000–1100 нм вносили в оптическую схему лазера достаточно большие потери. Тем не менее полученные уровень выходной мощности  $\sim 1.0$  мВт и диапазон спектральной перестройки более 80 нм оказались достаточными для измерения спектров оптического усиления и передаточных характеристик ПОУ типа II вплоть до насыщения его выходной мощности. Изменение тока инжекции ПОУ типа I в ходе спектральной перестройки лазера, производимое электронной системой автоматического контроля выходной мощности (АКМ), показано на рис.3. Контроллер АОПФ 8 позволял осуществлять как ручную перестройку длины волны, так и ее линейное свипирование в заданном спектральном интервале с частотой до 200 Гц. При этом «мгновенная» ширина линии генерации лазера не превышала 0.05 нм.

Выходное излучение лазера поступало на вход измерительной схемы (рис.2,б). Входной оптический изолятор

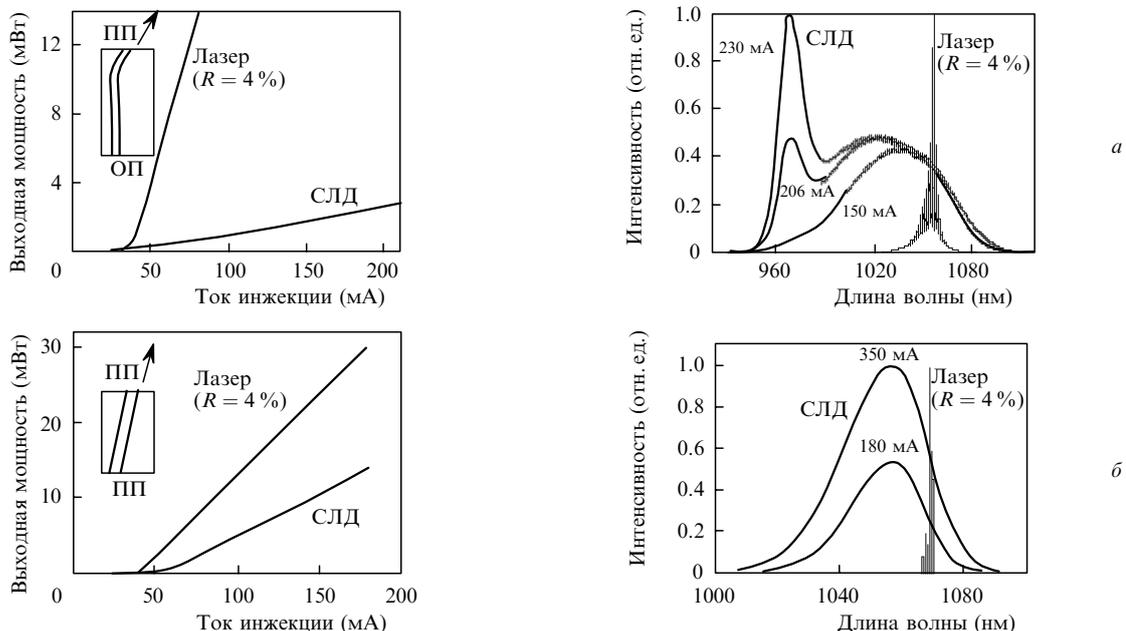


Рис.1. Ватт-амперные характеристики и спектры излучения ПОУ-модулей типов I (а) и II (б) в лазерном и суперлюминесцентном режимах.



вителя 5. В нем ПОУ II выполнял роль выходного усилителя мощности. И хотя частота свипирования 200 Гц недостаточна для целей ОКТ, этот макет позволил оценить достижимый уровень мощностных и спектральных характеристик. На рис.5 представлены спектры выходного излучения при постоянном токе инжекции  $I_{SOA} = 151$  мА и различных длинах волн задающего лазера. В области максимального усиления наблюдается практически полное подавление суперлюминесценции – спектральная яркость полезного сигнала превышает уровень фона (SMS) более чем на четыре порядка. На краях полосы усиления интегральная мощность суперлюминесцентного «педестала» соизмерима с мощностью полезного сигнала. На рис.6 иллюстрируется изменение выходной мощности и эволюция спектра выходного излучения в ходе спектральной перестройки. В частности видно, что в полосе 1030–1075 нм выходная мощность превышает 30 мВт, а превышение спектральной яркости полезного сигнала над уровнем фона составляет более 30 дБ.

В принципе данный макет может быть радикально усовершенствован. Добавление системы АКМ, управляющей током инжекции выходного ПОУ, позволило бы обеспечить постоянный уровень выходной мощности во всем диапазоне перестройки. Установка на выходе схемы АОПФ, идентичного фильтру задающего лазера и пере-

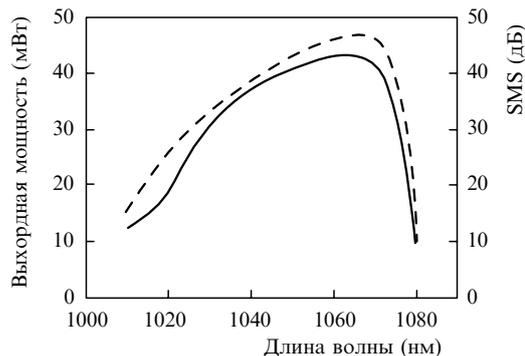


Рис.6. Зависимости выходной мощности (сплошная кривая) и превышения спектральной яркости выходного сигнала над уровнем суперлюминесцентного фона (штриховая кривая) от длины волны входного сигнала мощностью 0.5 мВт для ПОУ типа II.

страиваемого синхронно с ним, позволила бы примерно на два порядка увеличить SMS. И наконец, использование более быстродействующих АОПФ позволило бы повысить частоту свипирования. Все эти усовершенствования являются предметом дальнейших исследований и разработок.

#### 4. Заключение

Разработаны высокоэффективные ПОУ-модули с максимумом оптического усиления более 30 дБ на длине волны 1060 нм, полосой усиления более 30 нм и уровнем насыщения выходной мощности более 30 мВт. По сведениям авторов, такая комбинация рабочих характеристик ПОУ реализована впервые. Продемонстрирована перспективность использования этих модулей в качестве активных элементов перестраиваемых лазеров с внешним оптоволоконным резонатором.

Авторы выражают признательность А.А.Мармалюку за выращивание высокоэффективных ДКРС, Л.Н.Магдичу за разработку уникальных АОПФ и А.Т.Семенову за внимание к работе. Работа частично поддержана Минобрнауки РФ (проект РНП 2.1.1.1094).

1. Growe J.W., Ahearn W.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **2** (8), 283 (1966).
2. Kosonocky W.F., Cornely R.H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **4** (4), 125 (1968).
3. Alphonse G.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4648**, 125 (2002).
4. Lim H., de Boer J.F., Park B.H., Lee E.C.V., Yelin R., Yun S.H., *Opt. Express*, **14** (13), 5937 (2006).
5. Андреева Е.В., Магдич Л.Н., Мамедов Д.С., Руенков А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 324 (2006).
6. Shrinivasan V.J., Huber R., Gorczynska I., Fujimoto J.G., Jiang J.Y., Reisen P. *Opt. Lett.*, **32** (4), 361 (2007).
7. Fersher A.F., Drexler W., Hitznerberger C.K., Lasser T. *Rep. Prog. Phys.*, **66**, 239 (2003).
8. Drexler W., Morgner U., Ghanta R.K., Kartner F.X., Schuman J.S., Fujimoto J.G. *Nature Medicine*, **7** (4), 10 (2001).
9. Royce W.S., Chen B.A., Jay S., Duker M.D., Shrinivasan F., Fujimoto J.G. *Rev. Ophthalmol.*, July, 84 (2007).
10. Povazay B., Bizheva K., Hermann B., Unterhuber A., Sattmann H., Fersher A.F., Drexler W., Schubert C., Ahnelt P.K., Mei M., Holzwarth R., Wadsworth W.J., Knight J.S., Russel P.S.J. *Opt. Express*, **11** (17), 1980 (2003).
11. Nielsen F.D., Thrane L., Black J., Hsu K., Bjarklev A., Andersen P.E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5861**, 5851OH-1 (2005).
12. Лапин П.И., Мамедов Д.С., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 315 (2006).

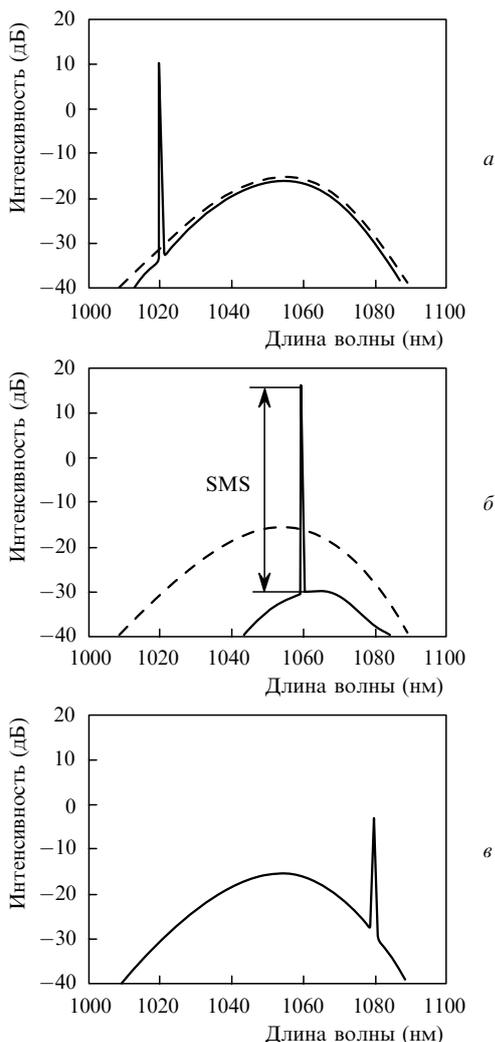


Рис.5. Спектры выходного излучения ПОУ типа II в отсутствие (штриховая кривая) и при наличии входного сигнала мощностью 0.5 мВт на длинах волн 1020 (а), 1060 (б) и 1080 нм (в).