

Перестраиваемый лазер на основе полупроводникового оптического усилителя красного диапазона спектра

Е.В.Андреева, А.С.Аникеев, С.Н.Ильченко, А.А.Лобинцов, А.Ю.Чаморовский, В.Р.Шидловский, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович

Исследован перестраиваемый лазер, содержащий в качестве активного элемента недавно разработанный полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ) бегущей волны красного диапазона спектра и акустооптический перестраиваемый фильтр во внешнем кольцевом оптоволоконном резонаторе. Реализована непрерывная перестройка длины волны излучения в спектральной полосе шириной до 20 нм со скоростью до 10^4 нм/с при ширине спектральной линии менее 0.04 нм и непрерывной выходной мощности до 2 мВт. Использование ещё одного такого же ПОУ в качестве выходного усилителя мощности позволило повысить её до 15 мВт.

Ключевые слова: перестраиваемый лазер, полупроводниковый оптический усилитель, акустооптический перестраиваемый фильтр.

1. Введение

Перестраиваемые полупроводниковые лазеры для красного диапазона спектра широко применяются в спектроскопии, оптической метрологии, медицине, биологии и в других областях. На рынке фотоники представлены десятки моделей приборов указанного типа, серийно выпускаемых фирмами LASER 2000, TOPTICA, O/E Land, Sacher Lasertechnik и др. (см., напр., [1, 2]). В совокупности полосы спектральной перестройки этих приборов перекрывают длинноволновый край видимого диапазона спектра, начиная с длины волны около 620 нм. В качестве активных элементов в них обычно используются пространственно-одномодовые лазерные диоды с просветлёнными гранями, изготавливаемые на основе многослойных AlGaInP/GaInPAs-наногетероструктур различного состава. Одночастотный режим лазерной генерации и спектральная перестройка обеспечиваются путём применения традиционных схем объёмных внешних резонаторов, содержащих управляемые спектрально-селективные элементы. Ширина полосы спектральной перестройки отдельных приборов составляет 5–15 нм, что определяется шириной полосы оптического усиления лазерных диодов, зависящей от геометрии и состава их активной области. Спектральные ширины линии генерации у приборов разных моделей сильно различаются и находятся в пределах $1–10^{-6}$ нм. Как правило, перестройка имеет кусочно-непрерывный характер. Выходная оптическая мощность

составляет единицы или десятки милливатт (сотни милливатт у МОРА-систем).

Для ряда практических применений оптимальными оказались перестраиваемые полупроводниковые лазеры серии BroadSweeper, в которых в качестве активных элементов используются полупроводниковые оптические усилители (ПОУ) бегущей волны, а управление длиной волны излучения обеспечивается акустооптическим перестраиваемым фильтром (АОПФ), расположенным во внешнем оптоволоконном резонаторе [3]. Полосы перестройки серийно выпускаемых приборов указанного типа в совокупности перекрывают спектральный диапазон 750–1100 нм [4]. Отдельный прибор имеет ширину полосы непрерывной перестройки около 100 нм и выходную оптическую мощность до 20 мВт. При относительно скромной спектральной ширине линии генерации (~ 0.1 нм) приборы обладают важным достоинством – возможностью строго линейного во времени свипирования частоты излучения между двумя любыми точками в пределах полосы перестройки со скоростью до 10^5 нм/с.

В настоящей работе исследован прототип аналогичного прибора для красного диапазона спектра. Для этого потребовались разработка соответствующих ПОУ и АОПФ, а также оптимизация необходимых оптоволоконных компонентов.

2. Схема эксперимента

Схема эксперимента представлена на рис.1. По существу она не отличается от схемы МОРА-системы, описанной в [3]. Отличия заключаются в используемых элементах схемы. В недавних работах [5, 6] сообщалось о создании серии суперлюминесцентных диодов (СЛД) для спектрального диапазона 665–685 нм с рекордными мощностными характеристиками. В качестве светоусиливающих элементов в разработанных ПОУ 1 применялись диоды этой серии с длиной поперечно-одномодового активного канала 1400 мкм. Модули собирались в корпусах типа Butterfly, содержащих микроохладитель Пельтье и термистор, обеспечивавших термостабилизацию ПОУ.

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, А.А.Лобинцов, В.Р.Шидловский, М.В.Шраменко. ООО «Оптон», Россия, 119330 Москва, ул. Мосфильмовская, 17Б

А.С.Аникеев. Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия, 119049 Москва, Ленинский просп., 4
А.Ю.Чаморовский. Superlum Diodes Ltd., Unit B3, Fota Point Enterprise Park, Carrigrohilly, Co Cork, Ireland T45FC93

С.Д.Якубович. Московский технологический университет (МИРЭА), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78;
e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

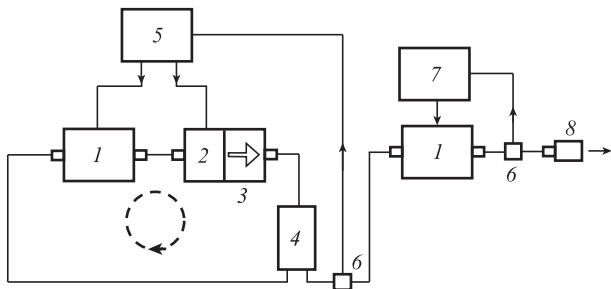


Рис.1. Оптическая схема перестраиваемого лазера с выходным усилителем мощности (система МОРА): 1 – ПОУ; 2 – АОПФ; 3 – оптический изолятор; 4 – оптоволоконный разветвитель; 5 – контроллер лазера; 6 – фотодиоды-мониторы систем АКМ; 7 – контроллер выходного ПОУ; 8 – выходной оптоволоконный коннектор; сплошными стрелками указаны электрические соединения.

Входным и выходным световодами служили отрезки оптоволоконна с сохранением поляризации PM630HP, имеющего длину волны отсечки менее 620 нм. Цилиндрические микролинзы на торцах световодов обеспечивали коэффициенты ввода/вывода излучения около 60%. Особенности процесса сборки ПОУ кратко изложены в [4]. АОПФ 2 был оптимизирован для оптического спектрального диапазона 650–700 нм, что потребовало нанесения соответствующих антиотражающих покрытий на грани кристалла TeO₂ и согласования с управляющим генератором в полосе частот 120–135 МГц. Остальные элементы внешнего кольцевого резонатора (оптический изолятор 3, оптоволоконный разветвитель 4 и фотодиоды-мониторы 6) были изготовлены с использованием упомянутого выше оптоволоконна. Электронные контроллеры 5, 7 управляли термостабилизацией активных элементов ПОУ и их токами инжекции. Контроллер 5 осуществлял также управление полосой пропускания АОПФ в ручном или в автоматическом режиме. В частности, имелась возможность реализовать автоматическое управление выходной оптической мощностью (АКМ) при перестройке генерируемой длины волны, в том числе в режиме свипирования со скоростью до 10⁴ нм/с.

Отметим, что рассмотренная схема позволяет провести измерения стационарных передаточных характеристик ПОУ при узкополосном входном сигнале. Для этого между перестраиваемым лазером и ПОУ следует разместить управляемый оптический аттенуатор и калиброванный оптоволоконный разветвитель. Ниже приводятся результаты проведённых экспериментальных исследований.

3. Основные физические характеристики перестраиваемого лазера

На рис.2 представлены ватт-амперные характеристики лазера при различных настройках (разных частотах управляющего СВЧ сигнала, подаваемого на АОПФ), соответствующих максимуму ($\lambda = 683$ нм) и краям контура оптического усиления ПОУ. Спектральная полуширина линии генерации (FWHM) в процессе перестройки изменяется слабо и находится в пределах 0.034–0.039 нм (рис.3) Перестроенные кривые в режиме АКМ при различных значениях непрерывной выходной мощности приведены на рис.4. При мощности 1 мВт ширина диапазона перестройки достигает 20 нм. По-видимому, это рекордный результат для перестраиваемых полупроводниковых

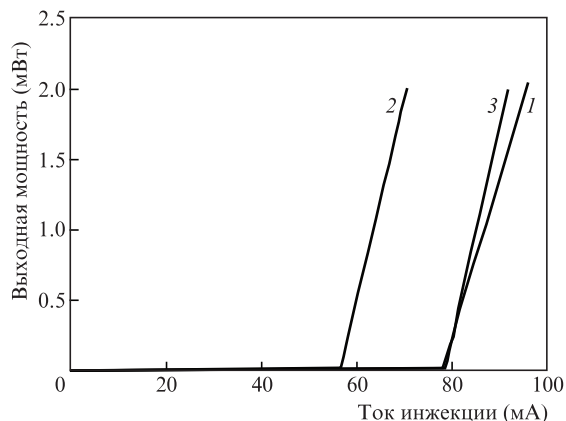


Рис.2. Ватт-амперные характеристики перестраиваемого лазера при настройках на длины волн $\lambda = 673$ (1), 683 (2) и 690 нм (3).

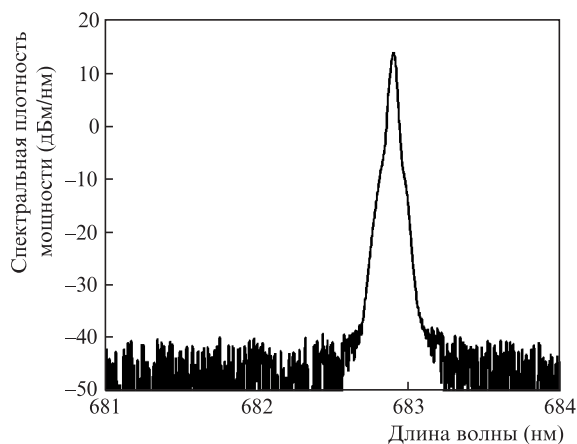


Рис.3. Спектр выходного излучения лазера при $\lambda = 683$ нм и выходной мощности $P_{out} = 1$ мВт.

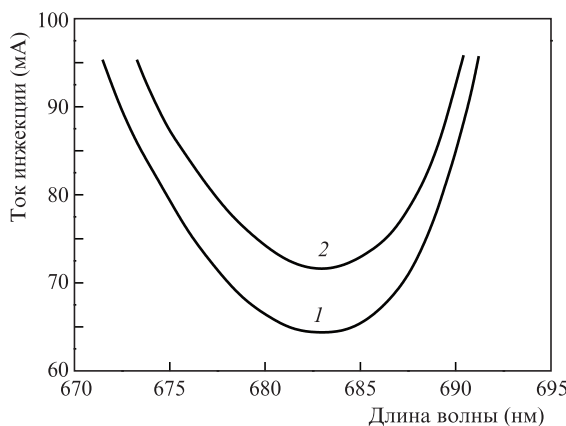


Рис.4. Перестроенные кривые лазера в режиме АКМ при выходных мощностях $P_{out} = 1$ (1) и 2 мВт (2).

лазеров красного диапазона спектра. Измерения спектра «чистого» (из волокна в волокно) оптического усиления ПОУ при узкополосном входном сигнале мощностью $P_{in} = 10$ мкВт показали (рис.5), что в спектральной полосе 670–690 нм усиление превышает 10 дБ при максимуме более 25 дБ. На рис.6 показаны передаточные характеристики ПОУ для узкополосных входных сигналов на длинах волн, соответствующих максимуму и краям диапазона оптического усиления. На рис.7 представлены ватт-

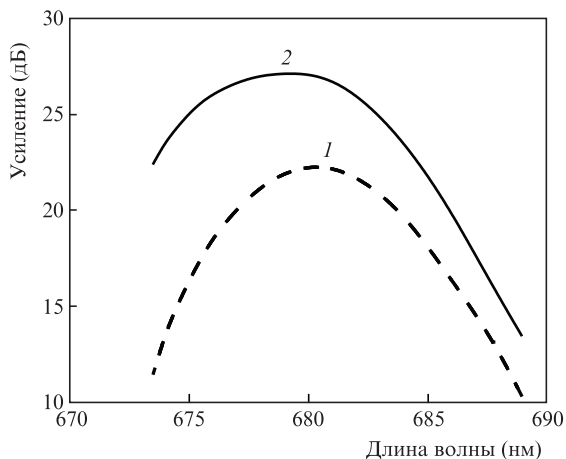


Рис.5. Спектр усиления слабого сигнала ПОУ при токах инжекции 90 (1) и 125 мА (2).

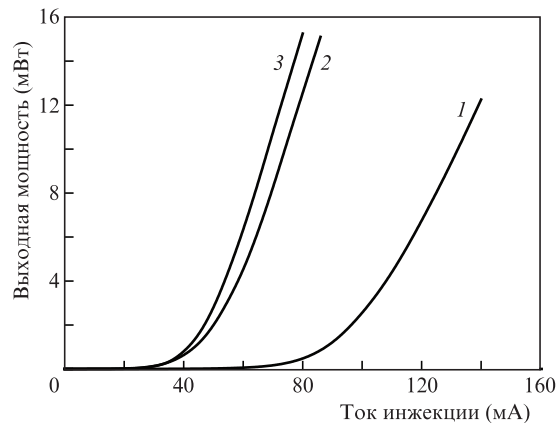


Рис.7. Ватт-амперные характеристики системы МОРА при мощностях на входе выходного ПОУ $P_{in} = 0$ (1), 1 (2) и 2 мВт (3).

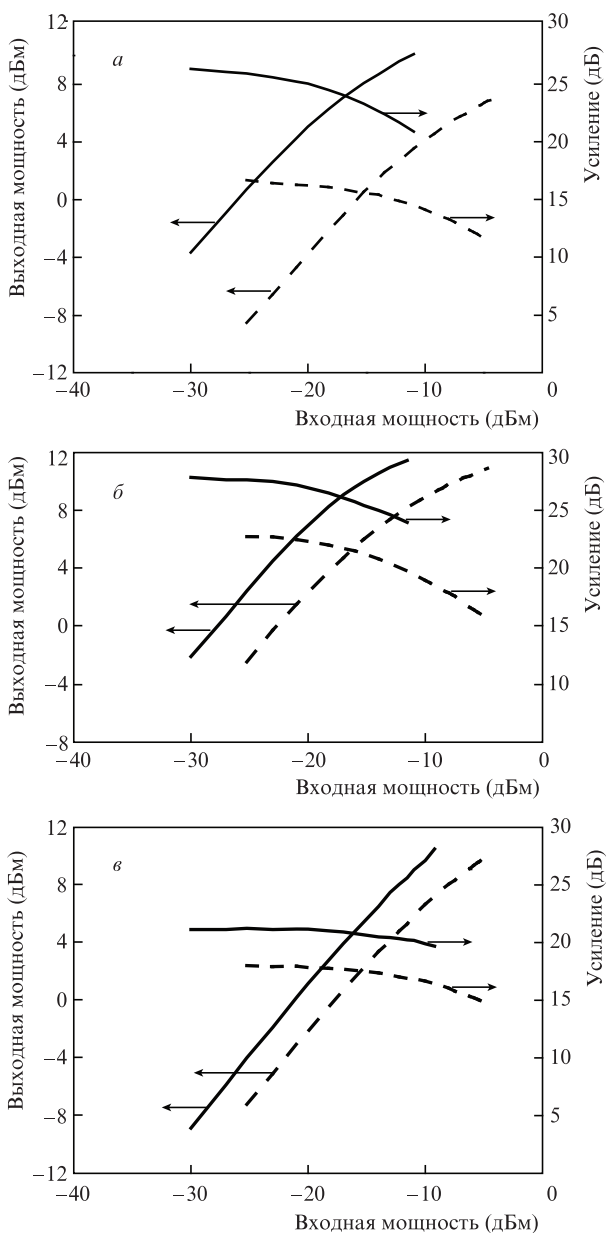


Рис.6. Передаточные характеристики ПОУ для узкополосных входных сигналов на длинах волн $\lambda = 675$ (а), 680 (б) и 685 нм (в) при токах инжекции 90 (штриховые кривые) и 125 мА (сплошные кривые).

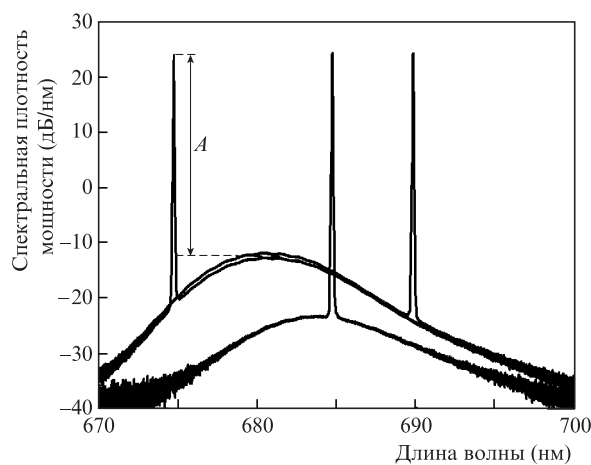


Рис.8. Спектры выходного излучения системы МОРА в режиме АКМ при $P_{in} = 1$ мВт, $P_{out} = 10$ мВт и $\lambda = 675$ (1), 683 (2) и 690 нм (3); A – превышение спектральной яркостью полезного сигнала суперлюминесцентного «пьедестала».

амперные характеристики системы МОРА в отсутствие входного сигнала, когда ПОУ работает в режиме СЛД, и при мощностях входного сигнала 1 и 2 мВт. Спектр усиленного излучения (рис.8) содержит суперлюминесцентный «пьедестал», высота которого зависит от степени насыщения оптического усиления входным сигналом. На рис.9 приведены перестроенная кривая системы МОРА в режиме АКМ при выходной мощности 10 мВт и соответ-

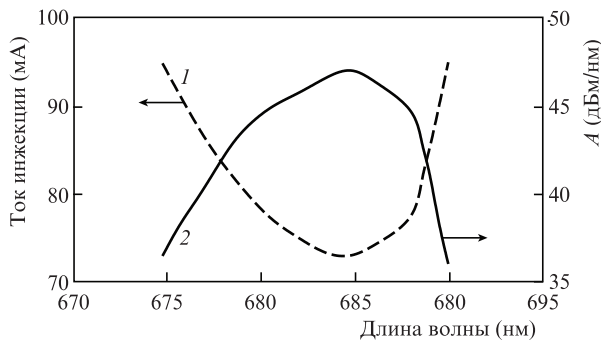


Рис.9. Перестроенная кривая системы МОРА (1) и зависимость от λ превышения A спектральной яркостью полезного сигнала суперлюминесцентного «пьедестала» (2) в режиме АКМ при $P_{in} = 1$ мВт, $P_{out} = 10$ мВт.

ствущая ей зависимость превышения спектральной яркостью полезного сигнала суперлюминесцентного фона.

4. Заключение

Совершенствование технологий роста и постростовой обработки AlGaInP/GaInPAs-наногетероструктур позволило разработать достаточно эффективные и надёжные ПОУ традиционной конфигурации, работоспособные в красном диапазоне оптического спектра, и реализовать на их основе лазеры с АОПФ во внешнем оптоволоконном резонаторе, перестраиваемые в диапазоне 670–690 нм со скоростью до 10^4 нм/с при мгновенной ширине спектра менее 0.04 нм и выходной мощности до 15 мВт.

В настоящее время производится внедрение в серийное производство исследованных приборов (предварительные названия моделей – SOA-262 и BS-680). Авторы выражают надежду, что эти приборы найдут практическое применение в спектроскопии и в оптической когерентной томографии, в частности в ОКТ полного поля

[7,8], для которой реализованная скорость свипирования длины волны является достаточной.

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

1. Duarte F.J. *Tunable Laser Applications* (New York: CRS press, 2016, pp 203–243).
2. www.laser2000.co.uk/lasers.php?category=5.
3. Костин Ю.О., Ладугин М.А., Лобинцов А.А., Мармалюк А.А., Чаморовский А.Ю., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **45** (8), 697 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (8), 697 (2015)].
4. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Лобинцов А.А., Мармалюк А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **43** (11), 994 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (11), 994 (2013)].
5. Andreeva E.V., Anikeev A.S., Il'chenko S.N., Chamorovsky A.Yu., Yakubovich S.D. *Electron. Lett.*, **53** (23), 1539 (2017).
6. Андреева Е.В., Аникеев А.С., Ильченко С.Н., Чаморовский А.Ю., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **47** (12), 1154 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (12), 1154 (2017)].
7. Hillmann D., Franke G., Hinkel L., Bonin T., Koch P., Huttmann G. *Proc. SPIE*, **8571**, 857104 (2013).
8. Spahr H., Hillmann D., Hain C., Sudkamp H.M., Franke G., Huttmann G. *Proc. SPIE*, **9312**, 93123B (2015).