

Светлой памяти профессора Л.А.Ривлина посвящается

Широкополосные полупроводниковые оптические усилители спектрального диапазона 750–1100 нм

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, М.А.Ладугин, А.А.Лобинцов, А.А.Мармалюк, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович

Разработана гамма полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) бегущей волны на основе наногетероструктур, используемых при изготовлении широкополосных суперлюминесцентных диодов. Коэффициенты «чистого» малосигнального усиления разработанных ПОУ-модулей составляют около 25 дБ, а полосы усиления по уровню –10 дБ достигают 50–100 нм. В совокупности ПОУ-модули перекрывают спектральный ИК диапазон 750–1100 нм. Продемонстрирована их высокая надежность при непрерывной выходной мощности через одномодовый волоконный световод до 50 мВт. Приведены примеры использования двух из разработанных ПОУ-модулей в качестве активных элементов широкополосных быстроперестраиваемых лазеров.

Ключевые слова: полупроводниковый оптический усилитель, перестраиваемые и одночастотные лазеры.

1. Введение

Физические характеристики полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) хорошо изучены, их исследованию посвящены сотни публикаций. Среди пионерских исследований однопроходных («бегущей волны») ПОУ следует отметить цикл работ, проведенных под руководством Л.А.Ривлина [1]. В настоящее время ПОУ нашли применение во многих областях техники, при этом первое место занимают волоконно-оптические системы передачи информации (ВОСПИ). В этих системах ПОУ используются не только для усиления оптических сигналов, но также в качестве модуляторов, логических затворов, переключателей, маршрутизаторов, нелинейных конверторов [2]. В настоящее время 50% мирового рынка лазеров в стоимостном выражении приходится на полупроводниковые лазеры, причем 31% этого объема составляют телекоммуникационные системы [3]. Данные по соотношению количеств используемых ПОУ и лазерных диодов (ЛД) отсутствуют, но очевидно, что ПОУ составляют весомую долю этого объема.

Серийно выпускается множество моделей ПОУ-модулей указанного назначения, в том числе широкополосных с шириной контура оптического усиления более 100 нм. Все сказанное относится к спектральному диапазону 1200–1700 нм. Локальные ВОСПИ с использованием ЛД видимого и ближайшего ИК диапазонов спектра также стремительно развиваются, однако в них ПОУ практиче-

ски не используются. Чаще всего ПОУ указанных диапазонов применяются в качестве выходных усилителей мощностей различных лазерных систем и в качестве активных элементов одночастотных и перестраиваемых лазеров с внешними спектрально-селективными резонаторами [4]. Например, фирма Sacher Lasertechnik (Германия) выпускает десятки моделей перестраиваемых полупроводниковых лазеров, в которых используются классические схемы внешнего резонатора Литтмана и Литтроу и ЛД с просветленными гранями в качестве активных элементов. Суммарный диапазон спектральной перестройки этих приборов составляет 630–1740 нм. Полосы перестройки отдельных приборов ближайшего ИК диапазона составляют около 20, 30, 40 и 50 нм в интервалах 750–800, 800–900, 900–1000 и 1000–1100 нм соответственно.

Как известно, использование полупроводниковых квантоворазмерных гетероструктур (наногетероструктур) позволяет реализовать в указанных спектральных диапазонах полосы оптического усиления шириной порядка 100 нм [5]. Однако до последнего времени ширина полосы усиления серийно выпускаемых ПОУ-модулей указанных диапазонов не превышала 40–50 нм (см., напр., [6]). Широкополосные суперлюминесцентные диоды (СЛД) в этих диапазонах имеют полуширины спектров около 50, 70, 95 и 110 нм соответственно [7–10]. При изготовлении широкополосных ПОУ бегущей волны на основе квантоворазмерных гетероструктур необходима оптимизация конструкции активных элементов. Желательно реализовать максимальную ширину полосы оптического усиления и при этом обеспечить достаточно высокий коэффициент однопроходного усиления, умеренный ток инжекции и относительно низкий уровень суперлюминесценции, которая в данном случае является паразитным фоном.

В рамках настоящей работы проведены исследования и разработка шести типов ПОУ-модулей, полосы усиления которых в совокупности полностью перекрывают спектральный диапазон 750–1100 нм. Описан также макет широкополосного быстроперестраиваемого лазера, в котором один из новых ПОУ-модулей использован в качестве активного элемента.

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, А.А.Лобинцов, М.В.Шраменко. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, а/я 70; e-mail: andreeva@superlumdiodes.com
М.А.Ладугин. ООО «Сигм Плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: maximladugin@mail.ru
С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.ru
А.А.Мармалюк. ОАО «НИИ «Полус им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: marm@splus.ru

Поступила в редакцию 30 мая 2013 г., после доработки – 31 июля 2013 г.

2. Экспериментальные образцы и их характеристики

Конфигурация активного канала исследованных ПОУ не отличалась от используемой в СЛД традиционной конструкции [9]. Он представлял собой прямой гребневидный волновод шириной около 4 мкм, имеющий наклон 7° относительно нормали к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены двухслойные просветляющие покрытия, обеспечивающие эффективный коэффициент отражения $\sim 10^{-4}$. Упомянутая выше оптимизация состояла в выращивании и постростовой обработке новых наногетероструктур с требуемыми оптическими свойствами, изготовлении на их основе экспериментальных образцов ПОУ, их исследовании и выборе оптимальной длины активного канала L_a . ПОУ-модули бегущей волны отличаются от светоизлучающих СЛД-модулей более сложной конструкцией и более трудоемкой технологией сборки. Главное отличие состоит в использовании двух, вместо одного, прецизионных узлов стыковки с входным и выходным одномодовыми волоконными световодами (ОВС). Кристаллы ПОУ монтировались на специальных теплопроводах, обеспечивающих удобный доступ торцевых микролинз ОВС к торцам активного канала. Сборка производилась в корпусах Butterfly, содержащих микроохлаждатели Пельтье и термисторы, предназначенные для термостабилизации ПОУ.

В ходе настоящей работы проведены технологические исследования по определению оптимальной комбинации припоев с различными температурами плавления, используемых при сборке ПОУ-модуля. Отметим, что законченный модуль содержит девять паяных соединений, выполненных с использованием пяти различных припоев с температурами плавления от 104 до 183 °С. В результате проведенных исследований была отработана хорошо воспроизводимая технология сборки, обеспечивающая изготовление надежных герметичных модулей, работоспособных при температуре окружающей среды от -55 до $+70$ °С. Входные и выходные ОВС изготавливались из изотропного волокна или волокна типа PANDA с длиной волны отсечки, соответствующей спектральной полосе усиления ПОУ. При необходимости концы световодов снабжались коннекторами типа FC/APC. Характеристики ПОУ-модулей изучались в условиях термостабилизации при 25 °С в непрерывном режиме инжекции.

Методика измерения основных технических характеристик ПОУ-модулей подробно описана в [7]. При проведении этих измерений используются два однотипных ПОУ-модуля, один из которых служит активным элементом перестраиваемого лазера, исполняющего роль генератора входного сигнала. На рис.1 представлены типичные спектры «чистого» однопроходного усиления (из

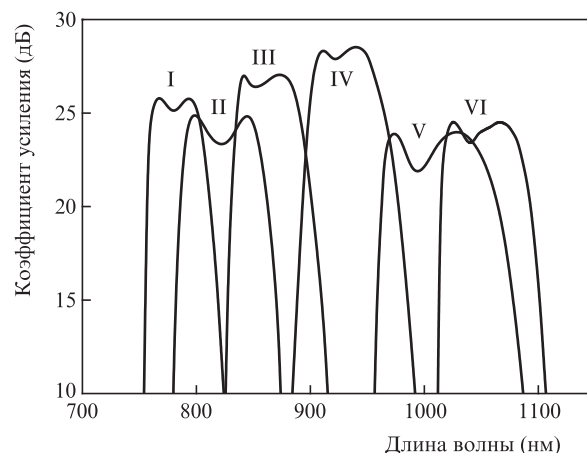


Рис.1. Спектры малосигнального усиления новых широкополосных ПОУ типов I–VI ближнего ИК диапазона.

ОВС в ОВС) разработанных ПОУ, измеренные при токах инжекции, обеспечивающих максимальную полуширину спектров. Следует отметить, что эти токи несколько выше токов, при которых происходит выравнивание спектральных максимумов излучения квантоворазмерных СЛД на основе тех же гетероструктур. По нашему опыту коэффициент усиления $G \sim 10$ дБ достаточен для выполнения пороговых условий при помещении ПОУ во внешний резонатор с разумным уровнем диссипативных и излучательных потерь. Исходя из этой оценки, эффективные полосы усиления рассматриваемых ПОУ составляют от 70 (тип I) до 125 нм (тип V).

Особенности геометрии и химического состава активных слоев гетероструктур типов I–VI отражены в табл.1. В последнем столбце указаны выходные мощности из ОВС, при которых ПОУ-модули прошли предварительные ресурсные испытания. Следует отметить, что выходная оптическая мощность в открытое пространство, соответствующая порогу катастрофической деградации, составляет у этих приборов от 80 до 150 мВт. Таким образом, по крайней мере отдельные типы ПОУ могут иметь заметно более высокие уровни выходной мощности (коэффициент ввода в ОВС составлял от 55% до 70%). Вопрос о том, как это отразится на сроке службы, требует отдельных исследований.

Ниже в качестве примера приводятся результаты измерений стационарных передаточных характеристик для ПОУ типа II. Ширина спектра входного сигнала, поступавшего на вход ПОУ через оптический изолятор, не превышала 0.05 нм. Его мощность регулировалась в широких пределах с помощью управляемого оптоволоконного аттенюатора. На рис.2 показана эволюция спектра усиления в линейном режиме при мощностях входного сигнала

Табл.1. Основные технические характеристики исследованных ПОУ. Структуры I–IV имеют одну квантовую яму, структуры V и VI – две.

Тип структуры	Состав и толщина активного слоя	Длина активного канала (мкм)	Полоса усиления по уровню 10 дБ (нм)	Максимальное усиление (дБ)	Максимальная выходная мощность (мВт)
I	$\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ ($1 \times 10,0$ нм)	1100	755–825	26	25
II	GaAs ($1 \times 9,0$ нм)	1200	795–875	25	50
III	$\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$ ($1 \times 11,0$ нм)	1200	825–915	27	30
IV	$\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ ($1 \times 6,0$ нм)	1200	885–990	28	30
V	$\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ ($2 \times 5,5$ нм)	1000	955–1080	25	20
VI	$\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$ ($2 \times 7,0$ нм)	1200	1010–1110	24	20

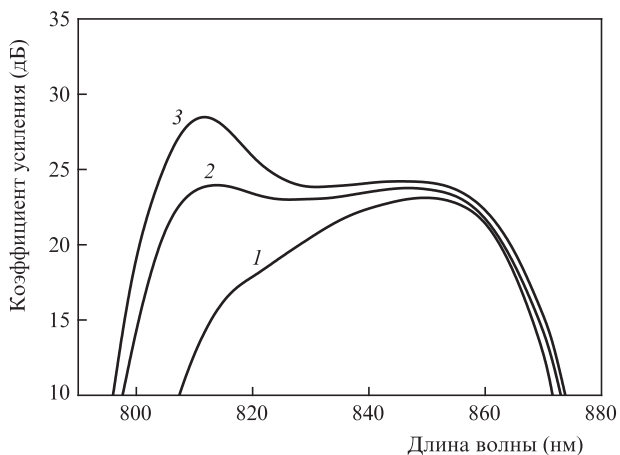


Рис.2. Спектры малосигнального усиления ПОУ (тип II) при токах инжекции $I_{SOA} = 100$ (1), 150 (2) и 200 мА (3).

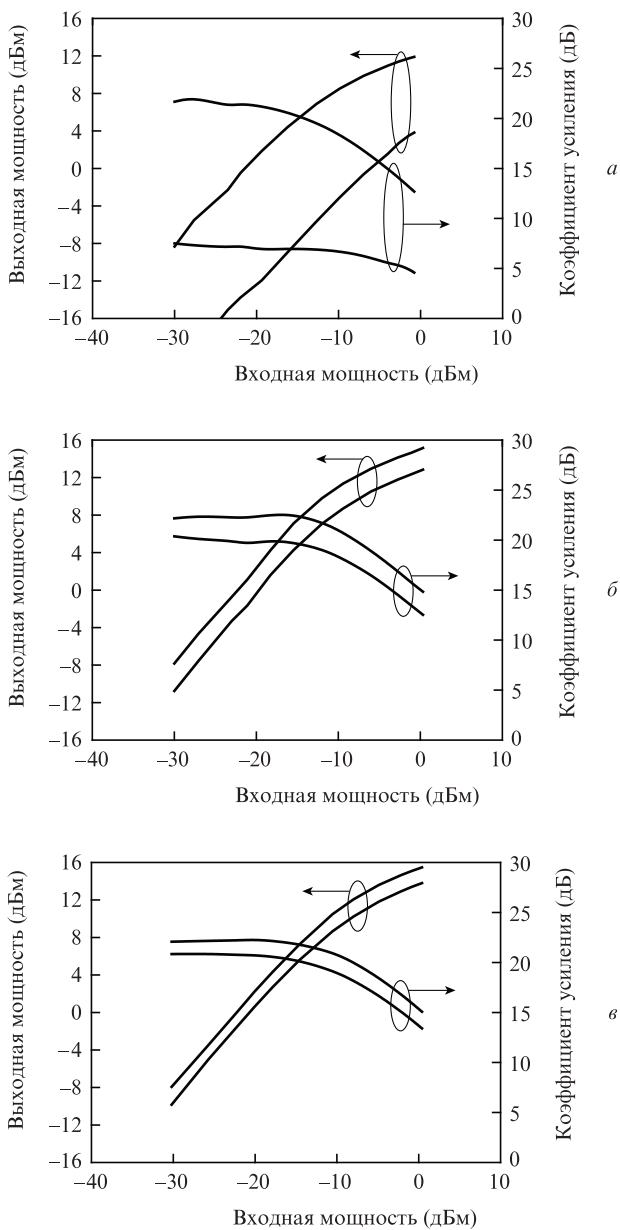


Рис.3. Передаточные характеристики узкополосного входного сигнала на длине волны 805 (а), 830 (б) и 860 нм (в) при $I_{SOA} = 100$ мА (нижние кривые) и 150 мА (верхние кривые) для ПОУ типа II.

ла, не превышающих -15 дБм. При малых токах инжекции достаточно высокое усиление наблюдается только в спектральной полосе, соответствующей квантовым переходам из основного состояния. С ростом уровня накачки в выходное излучение дают вклад также квантовые переходы из возбужденной подзоны.

На рис.3 представлены зависимости выходной мощности ПОУ и его коэффициента усиления от мощности входного сигнала на длинах волн 805, 830 и 860 нм, соответствующих краям и середине полосы усиления. Выходная мощность в режиме ручного или автоматического контроля мощности (АКМ) может поддерживаться на постоянном уровне за счет изменения тока инжекции ПОУ. При этом, правда, изменяется степень превышения (в дБ) полезным сигналом суперлюминесцентного пьедестала (SMS). Соответствующие спектры выходного излучения и зависимости тока инжекции ПОУ, а также величины SMS от длины волны входного сигнала представлены на рис.4. В данном случае ПОУ работал в режиме насыщения усиления ($G \approx 14$ дБ).

На рис.5 представлены хронограммы ресурсных испытаний трех ПОУ в двухпроходном режиме при выходной мощности 50 мВт. Приведенные кривые позволяют оценить срок службы, который составляет не менее 10000 ч. Аналогичные исследования и испытания были проведены и для остальных типов вышеупомянутых ПОУ. Это дало возможность приступить к выпуску шести новых моделей ПОУ-модулей с условными наименованиями SOA-332-785, SOA-352-830, SOA-352-870, SOA-472-930, SOA-522-1010 и SOA-542-1060. Эти приборы существенно превосходят по ширине полосы усиления аналоги, представленные на оптоэлектронном рынке.

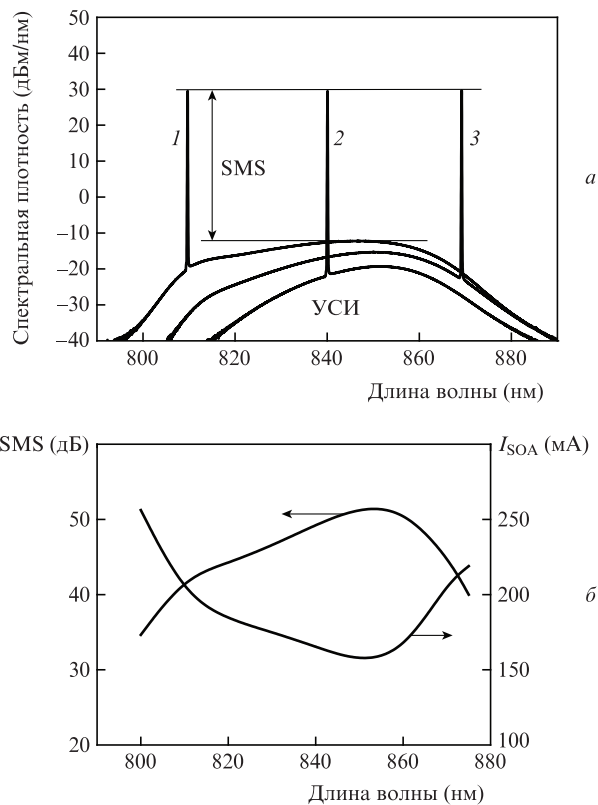


Рис.4. Спектры выходного излучения при полной выходной оптической мощности 50 мВт ($P_{in} = 2$ мВт) на длине волны 810 (1), 840 (2) и 870 нм (3) (а), а также зависимости SMS и I_{SOA} от длины волны входного сигнала (б). УСИ – усиленное спонтанное излучение.

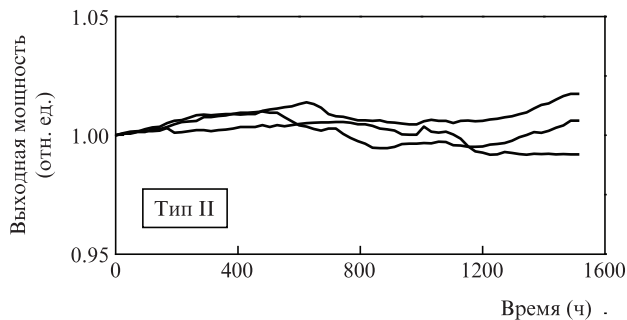


Рис.5. Хронограммы ресурсных испытаний ПОУ при непрерывной выходной мощности 50 мВт.

3. Полупроводниковый лазер, непрерывно перестраиваемый в спектральной полосе 1010–1110 нм

Ниже приведены результаты исследования макета перестраиваемого лазера, в котором ПОУ-модуль типа VI исполнял роль активного элемента. Во внешнем резонаторе лазера использовалось оптоволокно с сохранением поляризации Corning PANDA 980. Спектрально-селективным элементом служил акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ) с квазиколлинеарным взаимодействием оптической и акустической волн, подобный описанному в [11]. Хотя АОПФ обладает относительно крупными габаритами и относительно низким быстродействием, он имеет по сравнению с другими селективными элементами перестраиваемых лазеров неоспоримое преимущество – высокую точность и воспроизводимость «навязываемой» длины волны генерации, которая определяется частотой управляющего электронного ВЧ генератора. В отличие от схем, описанных в [11, 12], в настоящей работе был использован кольцевой оптоволоконный резонатор, содержащий совмещенный с АОПФ оптический изолятор, который обеспечивал однонаправленную генерацию. Такая схема позволяет получить более высокую выходную мощность, чем линейные схемы, в которых ПОУ работает в двухпроходном режиме. Исследованы два типа кольцевых схем (С1 и С2), отличающихся расположением выходного оптоволоконного разветвителя (рис.6). При оптимизации схем были использованы широкополосные разветвители РМТС-06 (AFR Ltd.) с коэффициентами деления 50:50, 30:70 и 20:80. Оптимальное соотношение между пороговым током и внешней эффективностью получено для второго из них. В схеме С1 разветвитель рас-

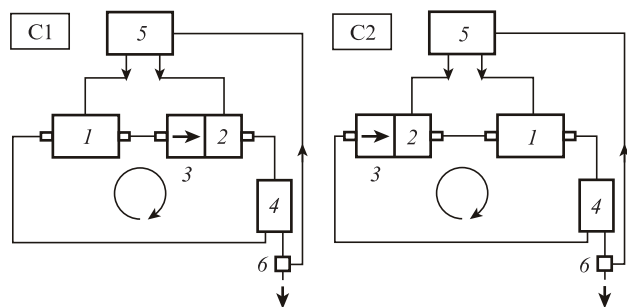


Рис.6. Схемы перестраиваемых лазеров с внешним кольцевым оптоволоконным резонатором: 1 – ПОУ-модуль типа II; 2 – АОПФ; 3 – оптический изолятор; 4 – оптоволоконный разветвитель 30:70; 5 – контроллер; 6 – фотодиод-монитор системы АКМ.

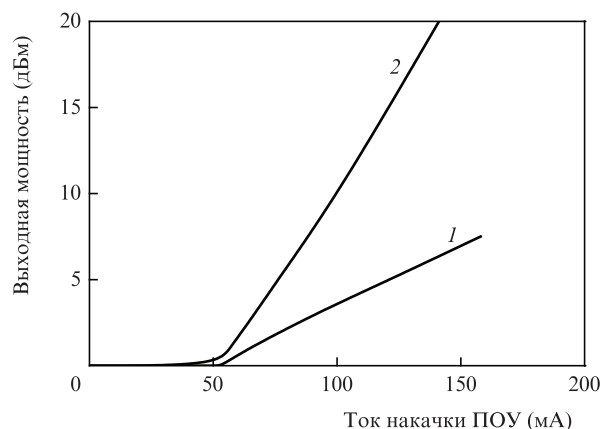


Рис.7. Ватт-амперные характеристики на длине волны 1060 нм для лазеров в схемах С1 (1) и С2 (2).

полагается после АОПФ, в схеме С2 – непосредственно после ПОУ. Преимущество первой схемы – «чистый» спектр выходного излучения ($SMS > 55$ дБ). Вторая схема позволяет реализовать более высокую выходную мощность, однако при этом в спектре выходного излучения присутствует суперлюминесцентный пьедестал, высота которого изменяется при перестройке лазера. Отметим, что для многих практических применений SMS на уровне 30–40 дБ является приемлемой. В частности, упомянутые во введении перестраиваемые лазеры на основе ЛД с просветленной гранью также не свободны от этого недостатка. Кроме того, для них характерна кусочно-непрерывная перестройка, тогда как рассматриваемые схемы обеспечивают непрерывную перестройку в пределах всей полосы усиления ПОУ.

На рис.7 представлены ватт-амперные характеристики лазеров обоих типов при настройке АОПФ на длину волны 1060 нм. Отметим, что схема С2 дает 2.5-кратный выигрыш по внешней эффективности. Перестроечные кривые лазеров в режиме АКМ при различных уровнях выходной мощности изображены на рис.8. Ток инжекции был ограничен значением 200 мА, при котором ПОУ-модуль прошел ресурсные испытания. Как и следовало ожидать, с уменьшением выходной мощности диапазон спектральной перестройки увеличивается. На рис.9 представлены типичные спектры выходного излучения лазеров. Для лазеров в схеме С1 относительный уровень фона не превышал –55 дБ и был ниже чувствительности использованного спектрометра ADVANTEST-Q8347. Для лазеров в схеме С2 значение SMS изменялось в пределах 30–50 дБ при спектральной перестройке и изменении уровня выходной мощности (рис.10). Контроллер ПОУ и АОПФ обеспечивал ручную перестройку с точностью 0.05 нм или свипирование длины волн по линейному закону в заданном диапазоне со скоростью до 10^4 нм/с. При этом мгновенная ширина линии не превышала 0.1 нм. Проведенные исследования позволили значительно усовершенствовать ранее выпускавшуюся модель перестраиваемого лазера BroadSweeper-1060-01, в которой были использованы менее эффективный ПОУ и линейная схема внешнего резонатора.

В работе [13] описан быстроперестраиваемый лазер на основе ПОУ типа V, который работал в двухпроходном режиме во внешнем резонаторе, содержащем дифракционную решетку и вращающуюся десятигранную зеркальную призму. Реализован диапазон спектральной перестройки 121.5 нм с центральной длиной волны 1020 нм

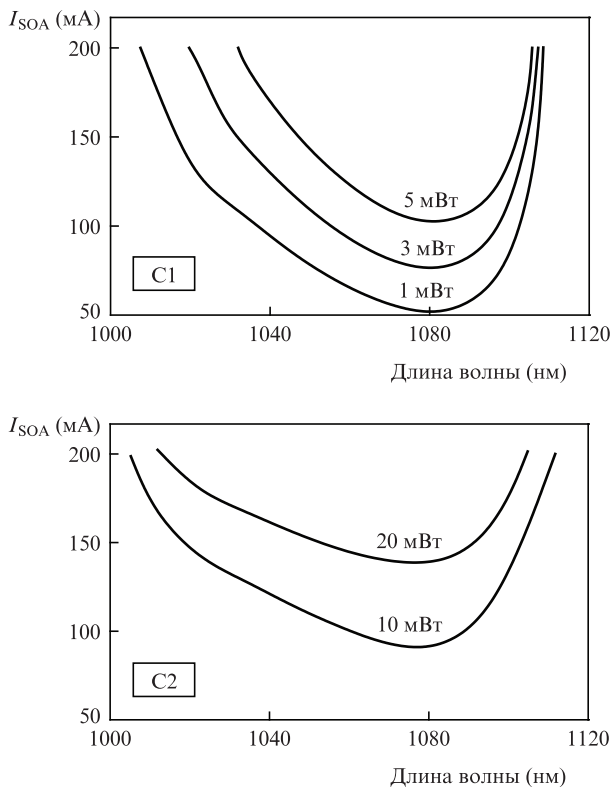


Рис.8. Перестроенные кривые при различных уровнях выходной мощности лазеров в схемах C1 и C2 (режим АКМ, ПОУ типа VI).

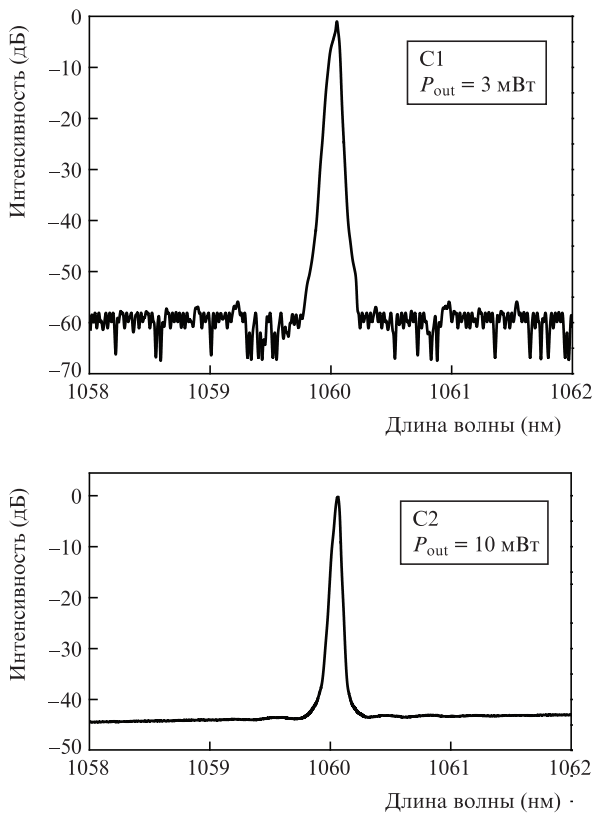


Рис.9. Спектры выходного излучения лазеров в схемах C1 и C2 при настройке на длину волны 1060 нм.

при средней выходной мощности 8.2 мВт и частоте свипирования 18 кГц с мгновенной шириной линии 0.085 нм. Использование этого лазера в качестве источника света

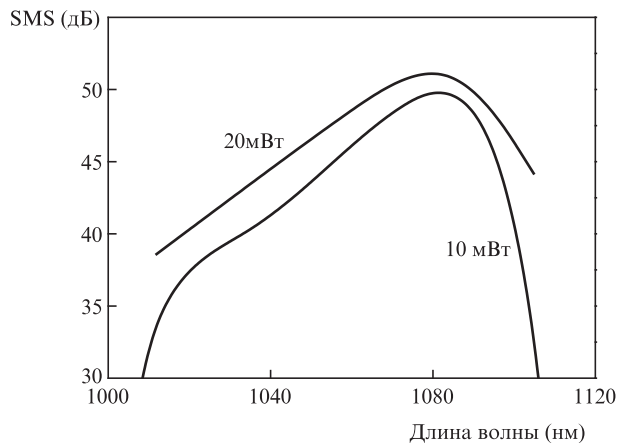


Рис.10. Зависимость величины SMS от длины волны при различных уровнях выходной мощности лазера в схеме C2.

в системе оптической когерентной томографии офтальмологического назначения позволило получить изображения сечений сетчатки и роговицы глаза с разрешением 2.9 мкм.

4. Заключение

Разработаны шесть новых моделей ПОУ-модулей бегущей волны, не имеющих серийных аналогов, на основе гетероструктур с квантоворазмерными активными слоями состава AlGaAs, GaAs и InGaAs с полосами оптического усиления шириной порядка 100 нм. В совокупности полосы усиления модулей перекрывают ИК диапазон 750–1100 нм. Продемонстрирована возможность эффективного использования таких ПОУ в качестве активных элементов перестраиваемых лазеров.

Авторы выражают признательность А.Т.Семенову за инициирование проведенных исследований и ценные обсуждения и Л.Н.Магдичу за предоставление усовершенствованного образца АОПФ. Работа частично поддержана Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (грант № 14.В37.2160756).

1. Ривлин Л.А., Семенов А.Т., Якубович С.Д. *Динамика и спектры излучения полупроводниковых лазеров* (М.: Радио и связь, 1983).
2. Connelly M.J. *Semiconductor optical amplifiers* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2002).
3. Overton G., Noguee A., Belforte D.A., Holton C. *Laser Focus World*, **49** (1), 36 (2013).
4. Buus J., Amann M.C., Blumental D. *Tunable laser diodes and related optical sources* (Hoboken: Wiley, 2005).
5. Helstein M.M., Mehuys B., Yariv A. *Appl. Phys.*, **54** (11), 1092 (1989).
6. Дураев В.П., Медведев С.В. *Научное приборостроение*, **22** (3), 53 (2012).
7. Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Кукушкин И.А., Ладугин М.А., Лапин П.И., Лобинцов А.А., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **41** (8), 677 (2011).
8. Kostin Yu., Lapin P., Shidlovski V., Yakubovich S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7139**, 713905-1 (2008).
9. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **33** (6), 471 (2003).
10. Лапин П.И., Мамедов Д.С., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 315 (2006).
11. Андреева Е.В., Магдич Л.Н., Мамедов Д.С., Руенков А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 324 (2006).
12. Лобинцов А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **38** (7), 661 (2008).
13. Sang-Won Lee, Hyun-Woo Song, Moon-Youn Jung, Seung-Hwan Kim. *Opt. Express*, **19** (22), 21227 (2011).