

Полупроводниковые лазеры с полосой непрерывной перестройки более 100 нм в «ближайшем» ИК диапазоне спектра

Ю.О.Костин, М.А.Ладугин, А.А.Лобинцов, А.А.Мармалюк, А.Ю.Чаморовский, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович

Разработаны два типа лазеров на основе новых квантоворазмерных полупроводниковых оптических усилителей с перестраиваемым акустооптическим фильтром во внешнем кольцевом оптоволоконном резонаторе. Они обладают полосами непрерывной спектральной перестройки шириной 780–885 нм и 880–1010 нм, непрерывной выходной оптической мощностью до 20 мВт и скоростью перестройки до 10^4 нм/с при мгновенной спектральной ширине линии менее 0.1 нм.

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

1. Введение

Оригинальная интерференционная методика, получившая название оптическая когерентная томография (ОКТ) [1], начала стремительно развиваться на рубеже 1980–1990-х гг. В настоящее время более 50 компаний серийно выпускают различные системы ОКТ, более 100 научных центров и лабораторий ведут исследования в этой области, запатентовано свыше 1000 технических решений, а число научных публикаций превысило 10000. Существуют различные области технического применения ОКТ, однако наиболее широкое распространение она получила в медицине и биологии, поскольку позволяет в реальном масштабе времени получать изображения участков биологических тканей *in vivo* бесконтактным методом. В традиционных методиках ОКТ (Time-Domain OCT, Fourier-Domain OCT) [2] используются источники света высокой яркости и низкой когерентности, работающие, как правило, в непрерывном режиме (чаще всего – суперлюминесцентные диоды (СЛД)). В последнее десятилетие интенсивно развивается новая методика ОКТ – Swept Source OCT, которая, в принципе, сможет позволить значительно расширить возможности метода и повысить качество получаемых томограмм. В этой методике в качестве источников света используются лазеры, быстро сканирующие по длине волны в широких спектральных диапазонах. В недавнем обзоре [3] описаны полтора десятка моделей серийно выпускаемых лазеров указанного типа, используемых в ОКТ-системах медицинского назначения.

Ю.О.Костин, А.А.Лобинцов, М.В.Шраменко. ООО «Оптон», Россия, 119330 Москва, ул. Мосфильмовская, 17Б
М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк. ОАО «НИИ «Полус» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: maximladugin@mail.ru
А.Чаморовский. Superlum Ltd., Unit B3, Fota Point Enterprise Park, Carrigtwohill, Co Cork, Ireland; e-mail: Alexander@superlum.ie
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 8 апреля 2015 г., после доработки – 6 мая 2015 г.

Все описанные лазеры построены на основе полупроводниковых активных элементов и различных быстроперестраиваемых спектрально-селективных элементов во внешнем резонаторе. В качестве последних используются: перестраиваемый фильтр Фабри–Перо; КТН-дефлектор в схеме Литтмана; управляемое распределённое брегговское зеркало в интегральном исполнении; вращающаяся многогранная зеркальная призма и дифракционная решётка; внешнее зеркало лазера с вертикальным резонатором, управляемое микроэлектромеханической системой (МЭМС); сканирующее зеркало, управляемое МЭМС, и дифракционная решётка; внешний оптоволоконный резонатор большой протяжённости с синхронизацией мод. Ширина полосы спектральной перестройки быстро сканирующих лазеров составляет 30–220 нм, частота сканирования – от единиц кГц до единиц МГц, длина когерентности излучения – от единиц до десятков мм, средняя выходная мощность равна 8–50 мВт. Все лазеры работают в спектральном диапазоне 1000–1600 нм. Единственным исключением является модель фирмы EXALOS с полосой перестройки 810–870 нм.

В перечень не попали перестраиваемые лазеры серии BroadSweeper, в которых в качестве спектрально-селективного элемента используются акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) [4, 5]. Эти лазеры не содержат подвижных механических элементов. Их длина волны излучения определяется частотой управляющего ВЧ радиосигнала, что обеспечивает высочайшую точность и воспроизводимость спектральной перестройки, а также строгую линейность зависимости частоты излучения от времени в режиме сканирования. К сожалению, частота сканирования не превышает 2 кГц, что недостаточно для большинства медицинских применений ОКТ. Однако для некоторых приложений ОКТ, в том числе и медицинских (см., напр., [6, 7]), эти лазеры оказались оптимальными. Кроме того, они представляют практический интерес для спектроскопии и оптической метрологии.

Важно отметить, что в совокупности лазеры BroadSweeper перекрывают оптический диапазон 750–1000 нм, в котором коммерчески доступные быстроперестраиваемые лазеры практически отсутствуют. В качестве активных элементов таких приборов используются специально разработанные широкополосные полупроводниковые оп-

тические усилители (ПОУ) бегущей волны на основе наногетероструктур. До недавнего времени ширина полосы перестройки отдельного прибора этой серии не превышала 80 нм. Разработка новых типов ПОУ на основе наногетероструктур со сверхтонкими активными слоями [8], обладающих уширенным спектром оптического усиления и достаточно высокой надёжностью, позволила реализовать прототипы новых моделей лазеров с полосой перестройки около 100 нм. В упомянутой работе [8] описан лазер, перестраиваемый в спектральном диапазоне 1010–1110 нм.

Настоящая работа посвящена исследованию двух новых лазеров данного типа, перестраиваемых в диапазонах 780–885 и 880–1010 нм.

2. Экспериментальные результаты

Заметное уширение полосы перестройки стало возможным благодаря изготовлению двух новых типов ПОУ бегущей волны на основе лазерных наногетероструктур со сверхтонкими активными слоями. Технология выращивания подобных структур методом МОС-гидридной эпитаксии кратко описана в [9]. Они представляли собой симметричные двусторонние гетероструктуры с отдельным ограничением (ДГС РО). Структура типа I имела ступенчатый световод толщиной 0.23 мкм и активный слой состава $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ толщиной 7.0 мкм. Структура типа II имела градиентный световод толщиной 0.4 мкм и активный слой состава $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ толщиной менее 6.0 мкм. Конструкция ПОУ не отличалась от описанной в [8].

На рис.1 представлены спектры усиления малого непрерывного узкополосного сигнала рассматриваемых ПОУ. Ширина полосы их усиления заметно больше, чем у описанных в [8] ПОУ типов II и IV тех же спектральных диапазонов. Предварительные ресурсные испытания в режиме двухпроходного усиления при непрерывной выходной мощности 20 мВт продемонстрировали достаточно высокую надёжность этих приборов. Их медианные сроки службы, определяемые, как время работы, при котором выходная мощность падает на 50%, составили около 15 000 и 50 000 ч соответственно.

На рис.2 показана оптическая схема исследованных приборов. Топологически она не отличается от схемы перестраиваемого лазера С1, описанной в [8]. Однако все элементы схемы – ПОУ, АОПФ, оптические изоляторы, широкополосные оптоволоконные разветвители, фотодиоды-мониторы, оптоволокно с сохранением поляризации (PANDA 850 вместо PANDA 980 в [8]) – отличались от описанных в [8]. На особенностях использованных ПОУ мы останавливались выше. Остальные элементы

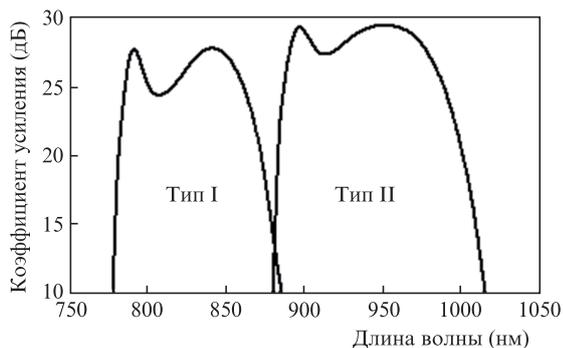


Рис.1. Спектры усиления малого сигнала ПОУ типов I и II при токах инжекции 250 и 220 мА соответственно.

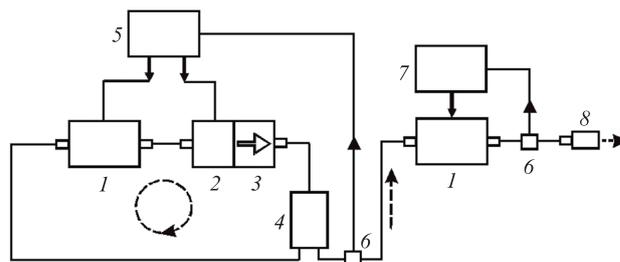


Рис.2. Схема перестраиваемого лазера с выходным услителем мощности:

1 – ПОУ; 2 – АОПФ; 3 – оптический изолятор; 4 – оптоволоконный разветвитель; 5 – контроллер лазера; 6 – фотодиод-монитор системы АКМ; 7 – контроллер выходного усилителя; 8 – выходной оптоволоконный разъём. Линии со сплошными стрелками соответствуют электрическим соединениям.

схемы были оптимизированы или специально разработаны для использования в соответствующих спектральных диапазонах.

Электронные контроллеры приборов серии BroadSweeper обеспечивают три режима работы:

- ручная перестройка длины волны излучения с точностью 50 пм с автоматическим контролем выходной оптической мощности (АКМ);
- свипирование (периодическое монотонное изменение) длины волны между двумя wybranными значениями в пределах диапазона перестройки со скоростью до 10^5 нм/с в режиме АКМ с внутренним запуском или с управлением внешними синхрои импульсами;
- «двухчастотный» режим – периодическое переключение с заданной частотой между двумя wybranными длинами волн из диапазона перестройки.

На рис.3 представлены примеры нормированных спектров стационарного выходного излучения лазеров обоих типов при различных настройках. В ходе перестройки длины волны в режиме АКМ изменяется ток инжекции ПОУ и степень превышения спектральной плотности полезного сигнала над суперлюминесцентным «педесталом» (SMS). В настоящем исследовании оптическая мощность на входе выходных усилителей поддерживалась на уровне около 2 мВт. При этом суперлюминесцентный фон практически отсутствовал – значение SMS превышало 55 дБ. Выходная мощность поддерживалась на уровне 20 мВт.

Рис.4 показывает изменение тока инжекции выходных ПОУ и величины SMS в ходе спектральной перестройки. Осциллограммы на рис.5 и 6 иллюстрируют работу лазеров в режиме свипирования длины волны и в «двухчастотном» режиме. Строго говоря, использованная электронная система АКМ поддерживает с высокой точностью (около 0.2%) не выходную мощность, а фототок диодов-мониторы (модели OPM-830-Si и OPM-930-Si производства OZ Optics), на которые отвечает 2% выходной мощности. В ходе перестройки последняя слабо изменяется в соответствии со спектральной чувствительностью фотодиодов (рис.5,а, б,а).

В принципе, описанные лазеры могут быть объединены в один прибор с общим оптоволоконным выходом, что позволит обеспечить диапазон непрерывной спектральной перестройки 780–1010 нм. Для этого могут быть использованы сверхширокополосные оптоволоконные разветвители для данного спектрального диапазона.

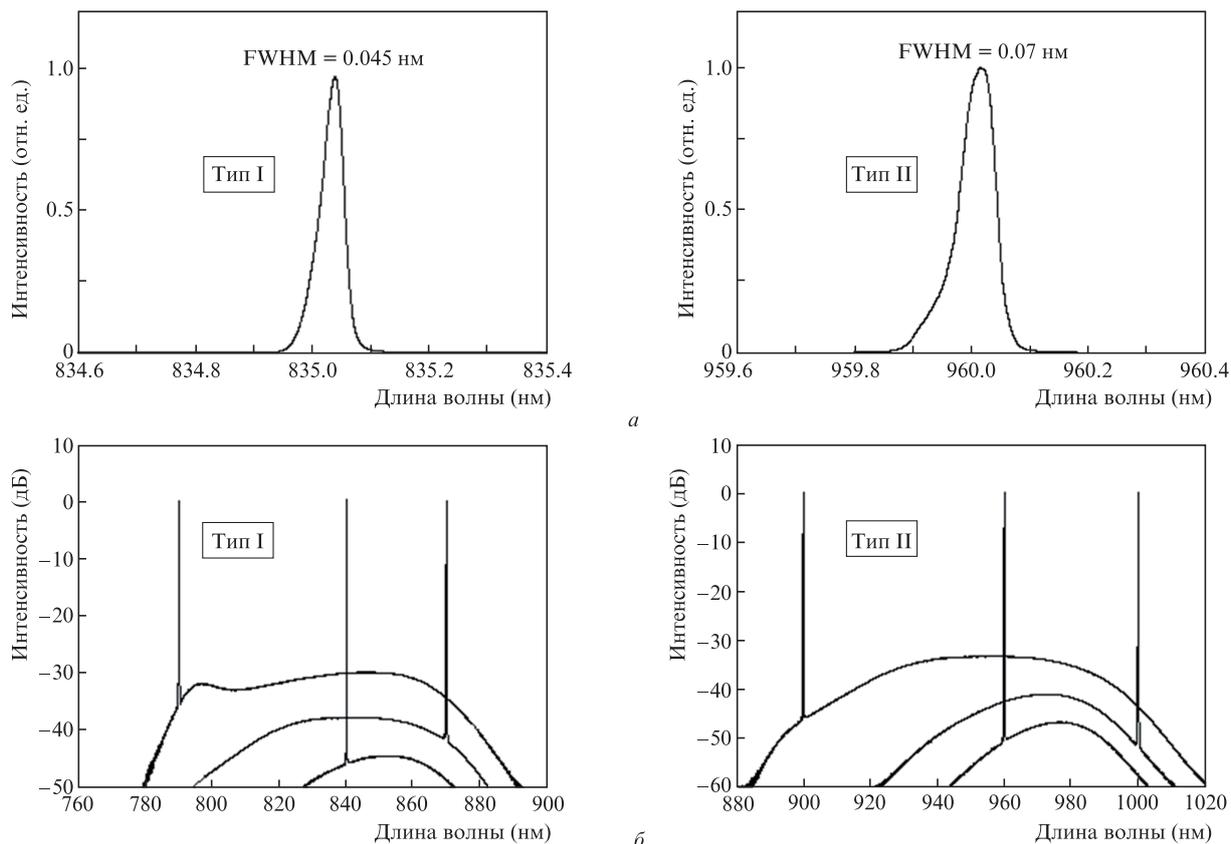


Рис.3. Спектры излучения лазеров типов I и II при выходной мощности 20 мВт и различных настройках в линейном масштабе при разрешении 0.002 нм (а) и в логарифмическом масштабе (б).

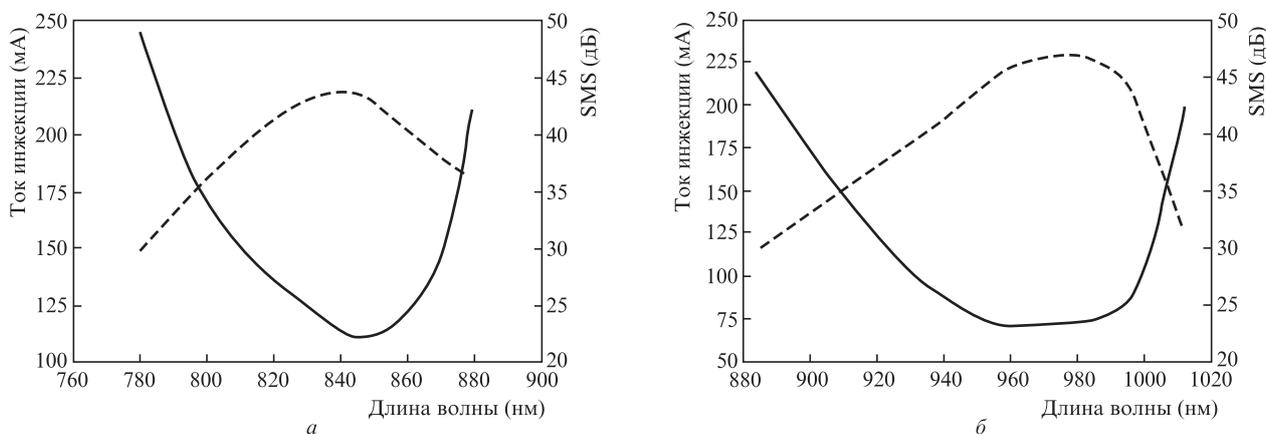


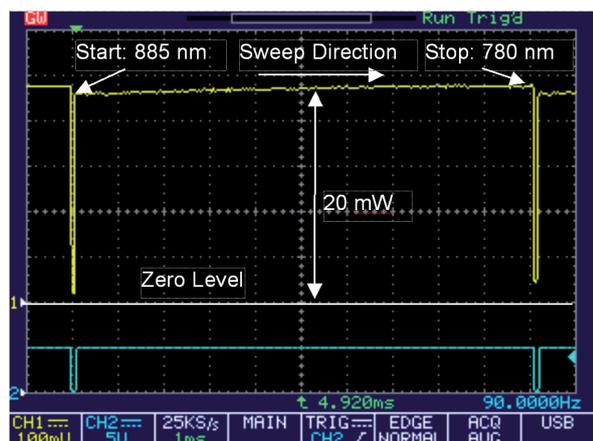
Рис.4. Изменение тока инъекции выходного ПОУ (сплошные кривые) и величины SMS (штриховые кривые) при спектральной перестройке лазеров типов I (а) и II (б); АКМ на уровне 20 мВт.

К сожалению, эти устройства имеют высокий уровень спектрально зависимых оптических потерь. Например, Y-разветвитель производства фирмы AFR Ltd. обеспечивает коэффициент деления около 50:50 в диапазоне 750–1050 нм. При этом спектр коэффициента оптических потерь имеет минимум на длине волны 840 нм, а на краях диапазона потери достигают 5.5 дБ. Таким образом, для технических применений, в которых ширина диапазона спектральной перестройки является ключевым параметром, а выходная мощность около 5 мВт приемлема, подобный прибор может быть реализован. Это, безусловно, потребует радикальной переработки электронного контроллера.

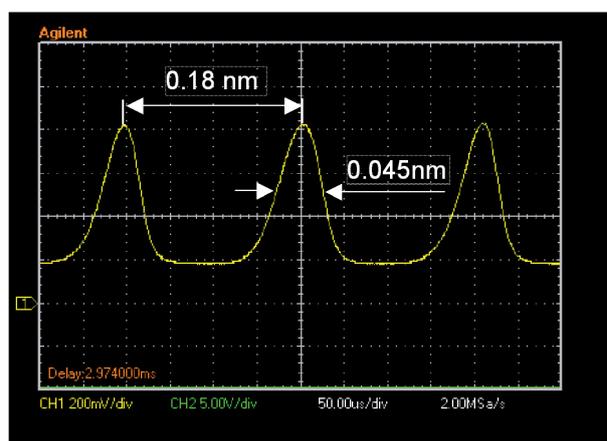
3. Заключение

Разработаны два новых типа быстроперестраиваемых полупроводниковых лазеров на основе кванторазмерных ПОУ и АОПФ во внешнем кольцевом оптоволоконном резонаторе. По ширине диапазонов непрерывной спектральной перестройки (780–885 и 880–1010 нм) они, по сведениям авторов, заметно превосходят существующие аналоги.

Авторы выражают признательность А.Т.Семёнову и В.Р.Шидловскому за инициирование проведённых исследований, а также Л.Н.Магдичу за оптимизацию конструкций АОПФ.

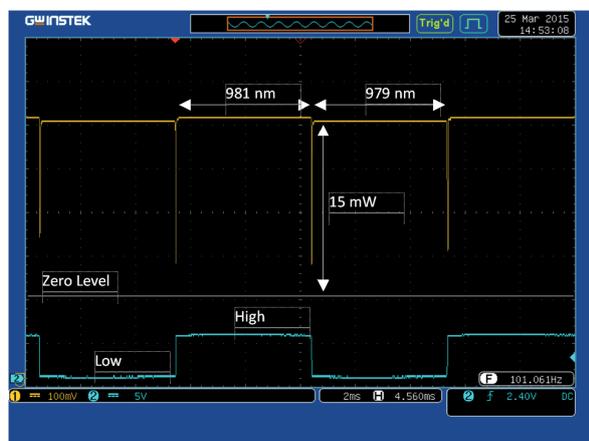


a

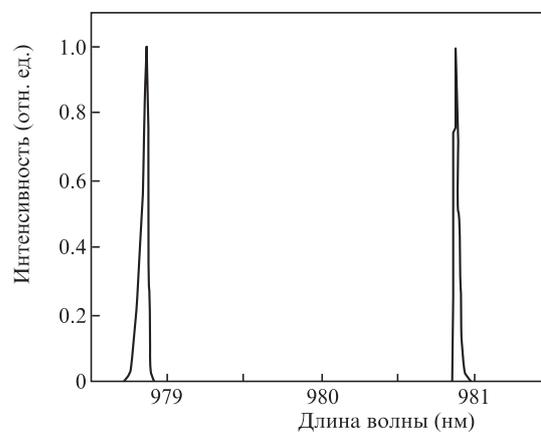


б

Рис.5. Осциллограмма, иллюстрирующая работу лазера типа I в режиме свипирования длины волны в диапазоне 780–885 нм с частотой 90 Гц в режиме АКМ (нижняя трасса – синхросигнал) (a), и осциллограмма сигнала, прошедшего через эталон Фабри–Перо с областью свободной дисперсии 0.18 нм (б).



a



б

Рис.6. Осциллограмма, иллюстрирующая работу лазера типа II в «двухчастотном» режиме с частотой переключения 101 Гц (нижняя трасса – синхросигнал) (a), и соответствующий усреднённый спектр выходного излучения (б).

Работа частично поддержана государственным заданием Минобрнауки РФ на проведение научных исследований.

- Drexler W., Fujimoto J.G. *Optical Coherence Tomography: Technology and Applications* (Berlin, Heidelberg: Springer Publishing, 2008).
- Leitgeb R., Hitztenberger C.K., Ferstner A.F. *Opt. Express*, **11** (8), 889 (2003).
- Drexler W., Liu M., Kumar A., Kamali T., Unterhuber A., Leitgeb R.A. *J. Biomed. Opt.*, **19** (7), 071412 (2014).
- Андреева Е.В., Магдич Л.Н., Мамедов Д.С., Руенков А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 324 (2006).
- Andreeva E.V., Mamedov D.S., Shidlovsky V.R., Shramenko M.V., Yakubovich S.D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6079**, 33 (2006).
- Shramehko M.V., Chamorovsky A.Yu., Hong Chu Liu, Lobintsov A.A., Karnovsky K., Wojtkovsky M., Yakubovich S.D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9312**, 93123B (2015).
- Spahr H., Hillman D., Hain C., Sudkamp H.M., Franke G.L., Nuttmann G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8213**, 82131S (2012).
- Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **43** (11), 994 (2013).
- Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **42** (11), 961 (2012).