

Перестраиваемый полупроводниковый лазер с акустооптическим фильтром во внешнем оптоволоконном резонаторе

Е.В.Андреева, Л.Н.Магдич, Д.С.Мамедов, А.А.Руенков, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович

Исследован перестраиваемый полупроводниковый лазер, в котором в качестве активного элемента использовался лазерный усилитель на основе двухпроходного суперлюминесцентного диода, а в качестве спектрально-селективного элемента – акустооптический фильтр во внешнем оптоволоконном резонаторе. Получена непрерывная спектральная перестройка в полосе шириной до 60 нм с центральной длиной волны 845 нм и «мгновенной» шириной линии генерации менее 0.05 нм. Частота свивирования в полном диапазоне перестройки достигала 200 Гц. Непрерывная выходная мощность автоматически поддерживалась постоянной и достигала 1.5 мВт при выводе излучения через одномодовый световод.

Ключевые слова: перестраиваемый лазер, полупроводниковый лазерный усилитель, суперлюминесцентный диод, акустооптический перестраиваемый фильтр, оптическая когерентная томография.

1. Введение

Перестраиваемым полупроводниковым лазерам посвящено огромное число публикаций. На рынке оптоэлектроники представлены десятки моделей этих приборов. Наиболее часто в них используются оптические схемы с внешним резонатором, содержащим управляемый спектрально-селективный элемент. В рамках настоящей работы решалась задача создания прототипа специализированного источника излучения ближнего ИК диапазона спектра для новых систем оптической когерентной томографии. Основными техническими требованиями, предъявляемыми к этому источнику, были следующие: достаточно большой диапазон перестройки (более 50 нм), возможность относительно быстрого (с частотой более 100 Гц) свивирования длины волны излучения и вывод излучения через одномодовый волоконный световод (ОВС). При этом требование к «мгновенной» спектральной ширине линии $\delta\lambda$ было скромным ($\delta\lambda < 0.1$ нм).

Исходя из этих требований, было решено применить в качестве активного элемента полупроводниковый лазерный усилитель (ПЛУ) на основе двухпроходных суперлюминесцентных диодов (СЛД), изготовленных с использованием однослойной квантоворазмерной гетероструктуры (КРС), описанной в [1, 2], а в качестве спектрально-селективного элемента во внешнем оптоволоконном резонаторе – акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ). К достоинствам АОПФ, весьма редко

применяемых в перестраиваемых полупроводниковых лазерах [3, 4], следует отнести широкую полосу перестройки и достаточно высокое быстродействие, а к недостаткам – относительно большие размеры, весьма сильную температурную зависимость рабочих характеристик и высокое энергопотребление. В данном случае эти недостатки не являлись препятствием для использования АОПФ, т. к. прибор был предназначен для лабораторных экспериментов.

2. Составные элементы и конструкция лазера

При изготовлении двухпроходного СЛД использовалась известная конструкция с искривлённым активным каналом [5]. На торец изогнутой части активного волновода, ось которого составляла угол 7° с нормалью к выходной грани кристалла, наносилось антиотражающее диэлектрическое покрытие. При оптимизации этого элемента требовалось определить длину активного канала, коэффициент отражения задней торцевой грани, расположенной по нормали к оси активного канала, и рабочий ток инжекции, обеспечивающий достаточно высокий уровень двухпроходного оптического усиления при максимальной ширине спектра усиления и достаточно малой остаточной модуляции модами Фабри – Перо. Были определены конструкция и рабочий режим СЛД, обеспечивающие для последних трех параметров значения около 20 дБ, 45 нм и 3 % соответственно. ПЛУ-модули собраны в стандартных корпусах типа Butterfly с выводом излучения через ОВС, сохраняющий поляризацию (ОВС типа PANDA). ТЕ-поляризации излучения СЛД соответствовала «медленная» ось волокна.

Типичные ватт-амперные характеристики этих модулей и их спектры излучения представлены на рис.1. В СЛД-режиме при отсутствии положительной оптической обратной связи выходные характеристики подобны характеристикам традиционных СЛД на основе данной КРС. При изготовлении на выходном ОВС скола, перпендикулярного его оси и имеющего коэффициент отра-

Е.В.Андреева, Д.С.Мамедов, А.А.Руенков, М.В.Шраменко. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, п/я 70; e-mail: andreeva@superlumdiodes.com, mamedov@superlumdiodes.com, shramenko@superlumdiodes.com; Л.Н.Магдич. ФГУП «НИИ "Полюс" им. М.Ф.Степанаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: lmagdich@mtu-net.ru С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 117454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

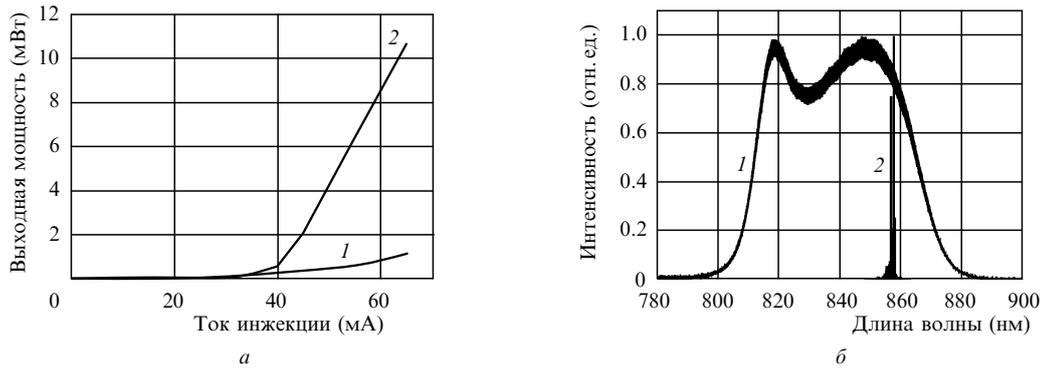


Рис.1. Ватт-амперные характеристики (а) и спектры выходного излучения (б) ПЛУ-модулей в СЛД-режиме (1) (при наклонном скосе выходного ОВС) и в лазерном режиме (2) (при перпендикулярном скосе).

жения 4 %, указанные характеристики приобретают ярко выраженный лазерный характер.

На основе таких ПЛУ-модулей, мелкосерийный выпуск которых начат в 2005 г. (модель SOA-371), могут создаваться одночастотные лазеры с использованием в качестве внешних резонаторов соответствующих волоконных брэгговских решеток (ВБР). Если же применять внешние резонаторы с управляемыми спектрально-селективными элементами, то возможна реализация перестраиваемых лазеров. Как указано выше, в данной работе в качестве такого элемента применялся АОПФ.

Выбор конструкции АОПФ был обусловлен требованием высокого спектрального разрешения, необходимого для получения достаточно узкой линии генерации лазера. В связи с этим наиболее перспективным представляется решение, предложенное в работе [6]. Принципиальное отличие геометрии данного акустооптического взаимодействия от других, используемых в АОПФ, заключается в том, что она не обеспечивает взаимодействия расходящегося светового пучка со звуковой волной, поскольку не выполняется условие параллельности касательных к поверхностям, на которых располагаются концы волновых векторов падающей и дифрагировавшей световых волн. Высокое разрешение возникает за счёт увеличения длины акустооптического взаимодействия L . В рассматриваемом устройстве используется излучение с расходимостью, близкой к дифракционной. Поэтому отказ от требования широкоугольности взаимодействия позволил реализовать такое взаимодействие света со звуком

в очень эффективном акустооптическом материале – парателлурите (TeO_2).

Направление фазовой скорости звука выбрано близким к направлению кристаллографической оси [110] (отклонение 2.2°). Этим обеспечиваются высокие значения действующего коэффициента акустооптического качества и двулучепреломления Δn . Световой луч направляется вдоль акустического пучка (рис.2). Если для оценки ширины аппаратной функции АОПФ на её полувысоте использовать известное выражение $\Delta\lambda = \lambda^2 / (\Delta n L)$ (где λ – оптическая длина волны), то при $\lambda = 840$ нм, $\Delta n = 0.145$ (TeO_2) и $L = 25$ нм получаем $\Delta\lambda = 0.2$ нм, что близко к спектральному разрешению, определённому при прямых измерениях характеристик экспериментальных образцов АОПФ.

На основе описанного элемента и оптоволоконных коллиматоров фирмы OZ Optics была разработана монолитная конструкция АОПФ с входным и выходным ОВС типа Corning PANDA. Основные характеристики этого устройства приведены ниже:

Спектральный диапазон (нм)	750–950
Спектральное разрешение (нм)	< 0.3
Эффективность связи ОВС/ОВС (%)	70
Время переключения (мкс)	40
Поляризация	линейная
Тип ОВС	SM85-PS-025A

Для обеспечения положительной обратной связи и вывода излучения из оптоволоконного резонатора была разработана оригинальная конструкция широкополосного полупрозрачного оптоволоконного зеркала. При этом использовалась модифицированная технология изготовления широкополосных ОВС-разветвителей [7]. Один из таких разветвителей с коэффициентом деления 96 : 4 применялся для отвлечения части выходного излучения в систему автоматического контроля мощности (АКМ).

Схема лазера показана на рис.3. Электронная схема серийного СЛД-контроллера PILOT-4 обеспечивала питание ПЛУ, его термостабилизацию и постоянство выходной оптической мощности в режиме АКМ. Использовался только непрерывный режим инжекции ПЛУ. В ходе экспериментов система АКМ могла отключаться, и ПЛУ переводился в режим автоматического контроля тока (АКТ) инжекции. Блок-схема оригинального контроллера АОПФ приведена на рис.4. Это устройство обеспечивало выходной высокочастотный (ВЧ) сигнал мощностью до 1 Вт, который мог перестраиваться по частоте в диапазоне 85–113 МГц, что соответствует оптическому

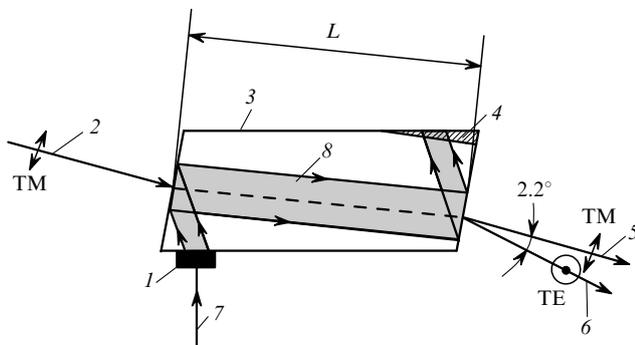


Рис.2. Схема АОПФ:

1 – пьезопреобразователь из ниобата лития; 2 – падающее поляризованное излучение; 3 – звукопровод из парателлурита; 4 – звукопоглотитель; 5 – прошедший свет (нулевой порядок дифракции); 6 – дифрагировавшее (отфильтрованное) излучение; 7 – ВЧ сигнал на входе АОПФ; 8 – звуковой пучок в кристалле парателлурита.

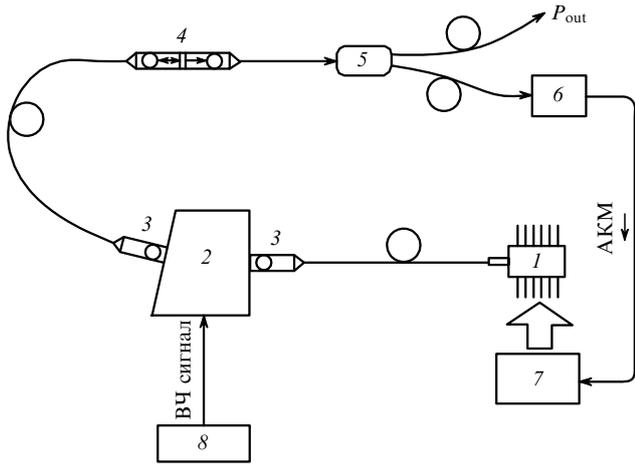


Рис.3. Схема перестраиваемого полупроводникового лазера с АОПФ во внешнем оптоволоконном резонаторе:

1 – ПЛУ-модуль SOA-371; 2 – АОПФ; 3 – оптоволоконный коллиматор; 4 – оптоволоконное зеркало ($R = 30\%$); 5 – оптоволоконный Y-разветвитель (96:4); 6 – pin-фотодетектор, вырабатывающий входной сигнал АКМ; 7 – контроллер ПЛУ PILOT-4; 8 – контроллер АОПФ.

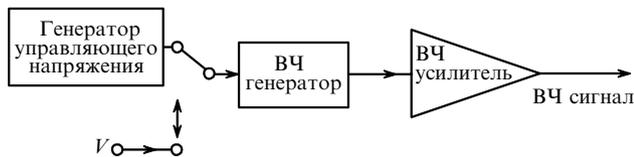


Рис.4. Блок-схема контроллера АОПФ.

диапазону перестройки АОПФ 750–950 нм и с большим запасом перекрывает полосу оптического усиления используемого ПЛУ. Частота ВЧ сигнала (центральная длина волны спектра пропускания АОПФ) определялась управляющим напряжением V , которое могло подаваться от внешнего источника или от встроенного генератора управляющего напряжения. Последний мог вырабатывать постоянное напряжение или напряжение, изменяющееся во времени по пилообразному закону. Максимальная скорость изменения напряжения (частота свипирования) заметно превышала быстродействие АОПФ.

3. Выходные характеристики лазера

На рис.5,а показаны ватт-амперная характеристика в СЛД-режиме, зарегистрированная в нулевом порядке дифракции АОПФ в отсутствие оптоволоконного зеркала, и ватт-амперная характеристика в лазерном режиме



при фиксированной настройке АОПФ на $\lambda = 860$ нм, соответствующую максимуму оптического усиления. По сравнению с кривыми на рис.1,а наблюдается снижение порога генерации и соответствующее снижение внешней квантовой эффективности. На рис.5,б приведены спектры излучения в лазерном режиме и режиме СЛД при токе инжекции ПЛУ $I = 65$ мА. В лазерном режиме АОПФ был настроен на $\lambda = 840$ нм, соответствующую центральной длине волны суперлюминесценции. При этом наблюдается сжатие спектра более чем на три порядка. Спектральная ширина лазерной линии $\delta\lambda$, измеренная анализатором ADVANTEST-Q8347, составила около 0.045 нм. В этой полосе возбуждается несколько сотен продольных мод внешнего резонатора, длина которого равнялась 1.5–2 м. Превышение спектрального максимума над пьедесталом составляло более 60 дБ. Степень поляризации выходного излучения была равна 98.5%.

На рис.6 представлены семейства перестроенных кривых лазера в режимах АКТ (без выходного Y-разветвителя) и АКМ, зарегистрированные при медленном дискретном изменении V . С ростом тока инжекции ПЛУ в режимах АКТ наблюдается расширение полосы спектральной перестройки лазера, связанное с соответствующим уширением полосы оптического усиления ПЛУ [1, 2]. В режиме АКМ полоса перестройки сужается с увеличением уровня стабилизируемой выходной мощности. Основным фактором, лимитирующим увеличение выходной мощности P_{out} и ширины полосы перестройки $\Delta\lambda_t$, является требование высокой надёжности лазера. При этом с точки зрения срока службы наиболее критичным элементом является ПЛУ. Оценка показывает, что в окончательной схеме лазера (рис.3) мощности $P_{out} = 2.0$ мВт соответствует мощность около 20 мВт на выходной грани ПЛУ. Такое соотношение мощностей определяется суммарными оптическими потерями в узле ввода/вывода излучения в ОВС, в оптоволоконных коллиматорах, в АОПФ, в Y-разветвителе и в сварных соединениях ОВС (на рис.3 не показаны).

Предварительные ресурсные испытания модулей SOA-371 показали, что превышение мощностью, выходящей в открытое пространство, величины 20 мВт неблагоприятно сказывается на сроке службы данных приборов. По этой причине в ходе дальнейших исследований выходная мощность не превышала указанного уровня, а рабочий ток ПЛУ был ограничен значением 100 мА. При работе в режиме АКМ достижение рабочим током этого значения определяло крайние точки и ширину спектральной полосы перестройки $\Delta\lambda_t$. Соответствующая зависимость показана на рис.7.

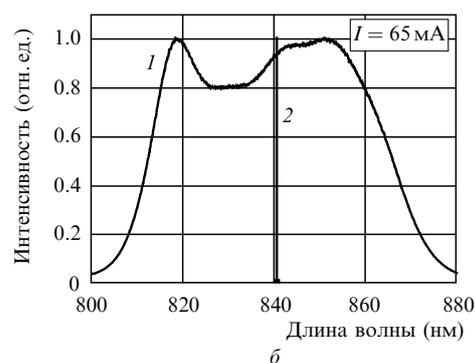


Рис.5. Ватт-амперные характеристики (а) и спектры выходного излучения (б) ПЛУ до помещения его во внешний резонатор (1) и в стационарном лазерном режиме (2) при настройке АОПФ на $\lambda = 860$ нм (а) и 840 нм (б).

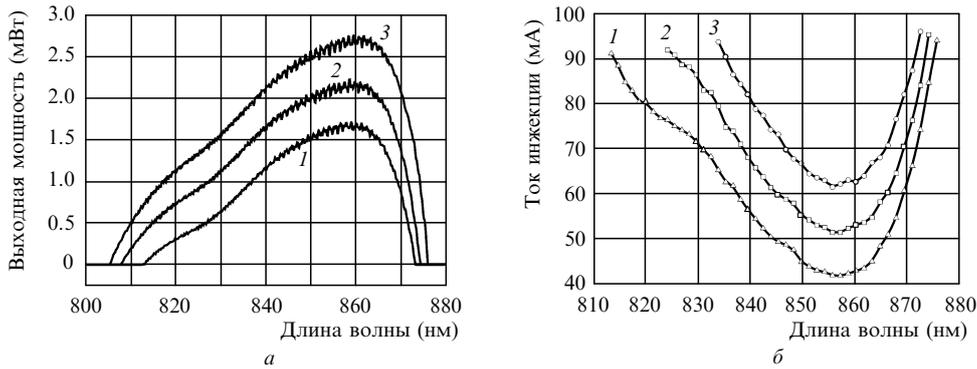


Рис.6. Перестроенные кривые лазера в режиме АКТ при токах инжекции ПЛУ 65 (1), 75 (2) и 85 мА (3) (а), а также в режиме АКМ при выходной мощности 0.5 (1), 1.0 (2) и 1.5 мВт (3) (б).

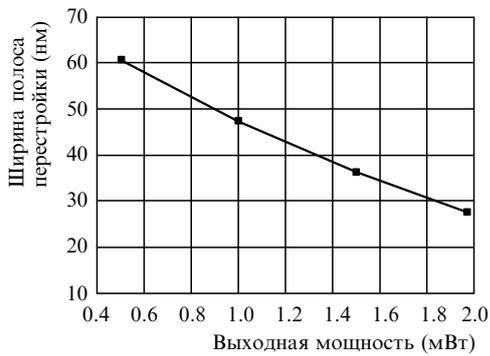


Рис.7. Зависимость ширины полосы непрерывной медленной перестройки лазера от выходной мощности в режиме АКМ.

В режиме свипирования дополнительным фактором, ограничивающим выходную мощность и ширину полосы перестройки лазера, является конечное быстродействие АОФ. С ростом скорости свипирования, определяемой скоростью изменения частоты управляющего ВЧ сигнала, чирп на дифракционной решетке, создаваемой в кристалле TeO_2 акустической волной, возрастает, а эффективность её дифракции падает. Это приводит к возрастанию оптических потерь во внешнем резонаторе лазера и снижению его выходной мощности. На рис.8 представлены зависимости максимальной выходной мощности при $\lambda = 860$ нм и ширины полосы перестройки от частоты свипирования при постоянной амплитуде управляющего сигнала АОФ в режиме АКТ при $I = 85$ мА. Эти зависимости показывают, что для рассматриваемого лазе-

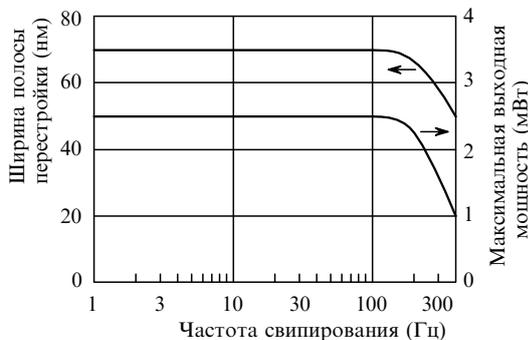


Рис.8. Зависимости максимальной выходной мощности и ширины полосы перестройки лазера в режиме АКТ при $I = 85$ мА от частоты свипирования при амплитуде ΔV , соответствующей спектральному диапазону перестройки АОФ 800–880 нм.

ра в случае свипирования в пределах полной полосы перестройки при частоте свыше 120 Гц наблюдается быстрая деградация выходных характеристик. В ходе доработки этого прибора было решено ограничиться частотой свипирования 200 Гц. Увеличение быстродействия АОФ неминуемо связано со снижением его спектрального разрешения. Определение оптимальных параметров АОФ, обеспечивающего максимальную частоту свипирования при сохранении плавной спектральной перестройки, требует дальнейших исследований.

На рис.9 показаны осциллограммы управляющего сигнала, определяющего длину волны лазерной генерации, синхроимпульсов и выходной мощности лазера при частоте свипирования 100 Гц. Лазер работал в режиме АКМ при выходной мощности (после Y-разветвителя) 1.5 и 0.5 мВт. При частотах свипирования до 200 Гц практически не наблюдалось увеличения «мгновенной» ширины спектральной линии лазера по сравнению со случаем стационарной генерации. Это иллюстрируют рис.9,а и г. На первом из них представлен спектр стационарной генерации лазера, а на втором для режима свипирования, соответствующего рис.9,а, приведена хронограмма излучения, прошедшего через эталон Фабри–Перо с областью свободной дисперсии 0.09 нм. Оценка «мгновенной» ширины линии даёт ~ 0.05 нм, что мало отличается от её стационарного значения.

4. Заключение

В последнее время лазерные источники излучения, допускающие скоростное свипирование длины волны, вызывают повышенный интерес разработчиков новых систем оптической когерентной томографии [8, 9]. На основании проведённых исследований разработан лабораторный прототип прибора, обладающего следующими основными техническими характеристиками:

Спектральный диапазон (нм).....	815–875
Оптическая мощность на выходе ОВС (мВт):	
режим малой мощности.....	0.5
режим высокой мощности.....	1.5
Ширина полосы спектральной перестройки (нм):	
режим малой мощности.....	60.0
режим высокой мощности.....	37.0
Спектральная ширина линии (нм).....	< 0.05
Степень подавления боковых мод (дБ).....	> 60
Частота свипирования (Гц).....	1–200

По нашим сведениям, такой источник излучения, работающий в ближнем ИК диапазоне спектра, разработан впервые.

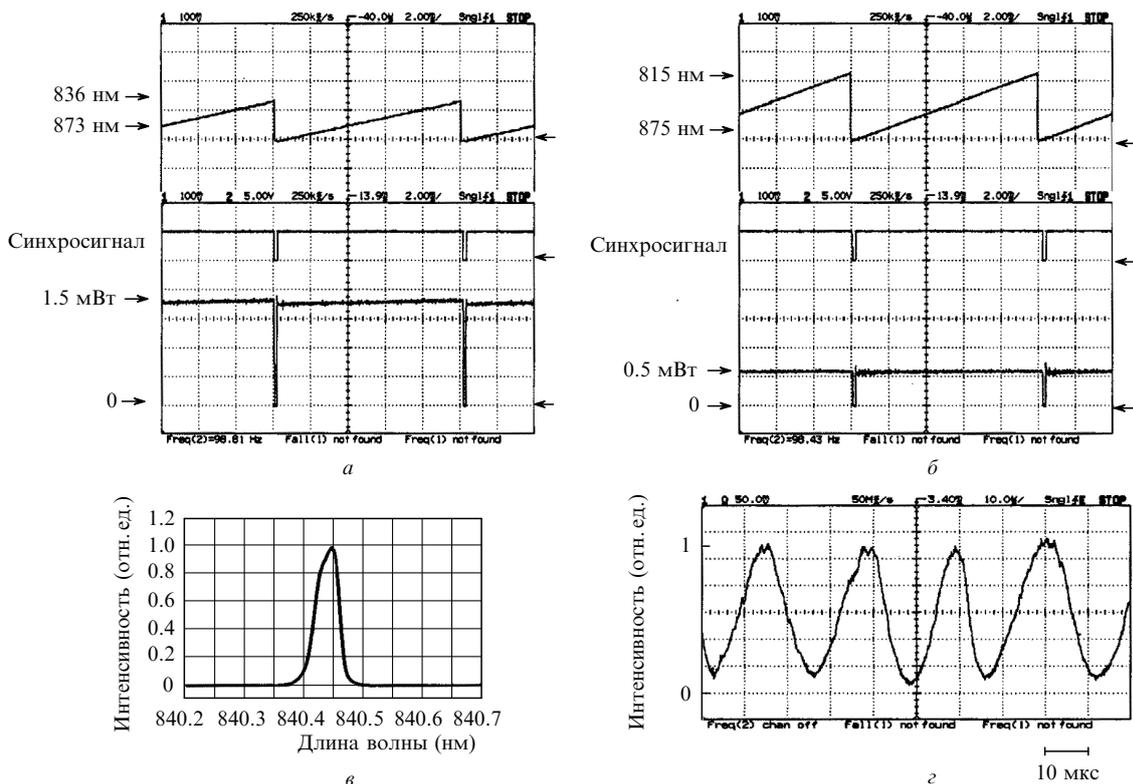


Рис.9. Осциллограммы управляющего напряжения, синхросигнала и выходной мощности в режиме АКМ при частоте свипирования 100 Гц, $P_{out} = 1.5$ и 0.5 мВт (а) и 0.5 мВт (б), а также спектр стационарной генерации (в) и хронограмма излучения, прошедшего через эталон Фабри–Перо (г) (режим свипирования, соответствующий рис.9,а).

Авторы выражают признательность В.Дрекселеру за инициирование данной работы и А.Т.Семёнову за внимание и поддержку. Работа частично поддержана грантом МНТЦ № 2651р.

1. Semenov A.T., Batovrin V.K., Garmash I.A., Shidlovski V.R., Shramenko M.V., Yakubovich S.D. *Electron. Lett.*, **31** (4), 314 (1995).
2. Батоврин В.К., Гармаш И.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Любарский А.В., Сафин С.А., Семёнов А.Т., Шидловский В.Р., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996).
3. Coquin G.A., Cheung K.W. *Electron. Lett.*, **24** (10), 599 (1988).

4. Takabayashi K., Takada K., Nashimoto N., Doi M., Tomabechi S., Nakazava T., Morito K. *Electron. Lett.*, **40** (19), 1187 (2004).
5. Semenov A.T., Shidlovski V.R., Safin S.A. *Electron. Lett.*, **29** (10), 854 (1993).
6. Voloshinov V. *Opt. Eng.*, **31** (10), 2089 (1992).
7. Адлер Д.С., Ко Т.Х., Конорев А.К., Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Фуджимото Дж.Дж., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **34** (10), 915 (2004).
8. Nielsen F.D., Thrane L., Black J., Hsu K., Bjarklev A., Andersen P.E. *Proc. SPIE-OSA Biomed Opt.*, **5861**, 58610H-2 (2005).
9. Huber K., Taira K., Wojtkowski M., Fujimoto J.G. *Proc. SPIE-OSA Biomed Opt.*, **5861**, 586111B-1 (2005).