

# Высокоэффективный полупроводниковый оптический усилитель спектрального диапазона 820–860 нм

А.А.Лобинцов, М.Б.Успенский, В.А.Шишкин, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович

*Разработан однопроходный полупроводниковый оптический усилитель с коэффициентом усиления до 32 дБ на длине волны 840 нм. Продемонстрирована его высокая надежность при непрерывной мощности излучения на выходе одномодового волоконного световода до 50 мВт. Приведены примеры эффективного использования такого усилителя в МОР-системах.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый оптический усилитель, МОР-система.

## 1. Введение

Исследование полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) началось в середине 60-х годов прошлого века в СССР и США вскоре после создания лазерных диодов (ЛД) [1, 2]. ПОУ отличаются от ЛД сильным подавлением оптической обратной связи, что позволяет реализовать значительно большее однопроходное усиление. Первыми были исследованы ПОУ бегущей волны на основе лазерных гомоструктур из GaAs с максимумом усиления вблизи длины волны 850 нм, которые могут работать только при криогенных температурах. После создания лазерных гетероструктур (GaAl)As/GaAs были исследованы ПОУ на их основе, работоспособные при комнатной и более высоких температурах. Большой вклад в эти исследования внесли группы Л.А.Ривлина и П.Г.Елисеева (ими было опубликовано более десяти статей только в журнале «Квантовая электроника»). В дальнейшем по мере создания ЛД на основе новых полупроводниковых материалов и структур («объемные» гетероструктуры, квантоворазмерные слоистые гетероструктуры, квантовые нити, квантовые точки) [3] также разрабатывались и изучались соответствующие ПОУ.

Наиболее массовое практическое применение нашли ПОУ спектрального диапазона 1250–1650 нм [4] в волоконно-оптических системах передачи информации. В настоящее время на оптоэлектронном рынке представлены десятки моделей приборов указанного типа. Что касается излучения «ближайшего» ИК-диапазона спектра (800–900 нм), то оно используется только в локальных системах, где ПОУ не требуются. ПОУ указанного диапазона часто применяются в качестве активных элемен-

тов лазеров с внешними резонаторами (объемными или на основе световодов) либо как выходные усилители (boosters) маломощных лазерных систем. Максимальные выходные мощности (единицы ватт в непрерывном режиме) обеспечивают ПОУ с «широкими», как правило, клиновидными активными каналами, которые интенсивно разрабатывались в начале 90-х годов (см., например, [5]). Эти ПОУ имеют близкую к дифракционной расходимость излучения, которое, в принципе, с использованием достаточно сложной оптики может быть введено в волоконные световоды, в том числе одномодовые (ОВС) [6]. Обычно же такие ПОУ применяются в объемных оптических схемах. Примером такой продукции могут служить чипы (CoS) серии TA производства TOP-TICA PHOTONICS.

ПОУ-модули традиционной конструкции с одномодовым активным каналом и ОВС на входе и выходе для рассматриваемого спектрального диапазона представлены на рынке весьма скромно. В качестве примера можно указать модель QSOA-840 производства QPHOTONICS, LLC и модели SOA-372, SOA-382 производства ООО «Суперлюминесцентные диоды». Эти модули имеют максимальный коэффициент усиления (из ОВС в ОВС) 20–25 дБ, полосу усиления 15–40 нм и уровень насыщения выходной мощности порядка 10 мВт. Приведенные параметры заметно уступают рекордным, достигнутым для подобных ПОУ в лабораторных экспериментах. Это объясняется тем, что высокоэффективные ПОУ подобно мощным суперлюминесцентным диодам (СЛД) работают в условиях экстремально высоких концентраций неравновесных носителей (в отличие от ЛД), поэтому очень трудно обеспечить их необходимую надежность, особенно для приборов на основе гетероструктур в системе (GaAl)As. В данной работе эту техническую проблему удалось решить благодаря усовершенствованным технологическим методам изготовления активных элементов ПОУ.

## 2. Экспериментальные образцы

Активные элементы исследованных ПОУ имели традиционную конструкцию. Их прямой активный канал представлял собой одномодовый гребневидный волно-

А.А.Лобинцов, М.В.Шраменко. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, а/я 70;

e-mail: shramenko@superlumdiodes.com

М.Б.Успенский, В.А.Шишкин. ФГУП «НИИ "Полнос" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Веденского, 3

С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), лаборатория прикладной физики, Россия, 117454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 12 февраля 2010 г.

вод шириной 4.0 мкм и длиной 1600 мкм. Его ось имела наклон  $7^\circ$  относительно нормали к торцевым граням кристалла, на которые были нанесены просветляющие диэлектрические покрытия.

При изготовлении активных элементов использовалась однослойная квантоворазмерная (GaAl)As/GaAs-гетероструктура, выращенная методом газотранспортной эпитаксии из металлоорганических соединений (МО CVD) на установке AIXTRON. В отличие от ростовой установки СИГМОС-130, используемой при изготовлении большинства СЛД и ПОУ, производимых ООО «Суперлюминесцентные диоды», указанная установка обеспечивает лучшую однородность выращиваемых слоев и более высокое совершенство гетерограниц.

Другим технологическим приемом было применение метода трансформаторно-связанного плазменного травления со средней энергией ионов 150 эВ при формировании гребневидного волновода. В отличие от ранее использовавшегося метода ионно-химического травления со средней энергией ионов около 500 эВ, примененный метод вносит значительно меньше дефектов в приповерхностную область кристалла [7].

Использование усовершенствованной технологии при изготовлении СЛД на основе «объемной» (GaAl)As/GaAs-гетероструктуры (серия SLD-38, выходная оптическая мощность через ОВС до 10 мВт) позволило повысить их срок службы до  $(5 - 10) \times 10^4$  ч, что подтверждено обширной статистикой. Как будет показано ниже, данная технология обеспечила заметное повышение надежности квантоворазмерных СЛД и ПОУ, работающих при значительно более высоких выходных мощностях.

Активные элементы ПОУ монтировались на термоэлектрических микроохладителях в корпусах типа Vutترفly, содержащих встроенные термисторы. При использовании контроллеров типа Pilot-4 термостабилизация активного элемента на уровне  $25^\circ\text{C}$  при рабочем токе до 450 мА обеспечивалась при температуре окружающей среды от  $-55^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$ . В качестве входных/выходных ОВС использовались изотропные волокна типа Corning Pure Mode 780 или волокна с сохранением поляризации типа Corning Panda 850. В стыковочных узлах применялись торцевые скошенные микролинзы.

### 3. Результаты экспериментов

Для определения допустимого уровня выходной мощности активные элементы ПОУ были подвергнуты испытаниям на оптическую стойкость в режиме СЛД. Порог их катастрофической оптической деградации (КОД) в непрерывном режиме инжекции при  $25^\circ\text{C}$  составил 200–240 мВт в открытое пространство. Уже это говорит о целесообразности применения указанных технологических усовершенствований. Для сравнения отметим, что СЛД аналогичной конструкции, изготовленные на основе той же гетероструктуры с использованием традиционной технологии, имеют порог КОД 100–150 мВт. В ходе дальнейших исследований мы ограничились уровнем выходной мощности через ОВС 50 мВт, что соответствует приблизительно 100 мВт в открытое пространство. В режиме СЛД такая выходная мощность с обеих граней активного элемента достигалась при токе инжекции около 400 мА. Предварительные ресурсные испытания в этом режиме позволили оценить среднее время жизни образцов, которое составило более 7000 ч.

В эксперименте использовалась схема измерений (рис.1), подобная описанной в [8]. Главное отличие состояло в том, что в качестве источника входных сигналов применялся перестраиваемый лазер BroadSweeper-840 [9]

Диапазон спектральной перестройки (нм) . . . . .	825–875
Спектральная ширина (FWHM) линии излучения (нм) . . . . .	0.05
Выходная оптическая мощность (мВт)	
режим Low . . . . .	1.0
режим High . . . . .	3.0
Степень подавления побочных мод (SMS) (дБ) . . . . .	> 50
Степень поляризации (%) . . . . .	> 90

со следующими основными выходными характеристиками:

Лазер имел следующие режимы спектральной перестройки: ручной, линейное периодическое свипирование со скоростью до  $10^4$  нм/с, а также «двухчастотный» (переключение между выбранными длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  с заданной скоростью).

В данной схеме исследовался ПОУ-модуль с ОВС типа Panda. Все оптические соединения были выполнены из этого же волокна с совмещением осей при сварке. Оптический изолятор 2 (AC Photonics 850PM) в указанной спектральной полосе обеспечивал ослабление отраженного сигнала более 25 дБ, что практически полностью подавляло паразитную обратную связь из-за отражения на выходном зеркале лазера. С учетом потерь в изоляторе, аттенуаторе 3, калиброванном разветвителе 4 и точках сварки мощность входного сигнала ПОУ 5 могла изменяться в пределах от долей микроватт до 1.0 мВт. Коэффициент оптического усиления рассчитывался по формуле:

$$G = 10 \lg \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{out}}(P_{\text{in}} = 0)}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

На рис.2 представлены спектры оптического усиления при малом входном сигнале ( $P_{\text{in}} = 1.0$  мкВт), измеренные при различных токах инжекции ПОУ. К сожалению, из-за ограниченной полосы перестройки длины волны лазера ( $\lambda_{\text{min}} = 825$  нм) нам не удалось записать коротковолновое крыло зависимости  $G(\lambda)$ . Приведенные кривые

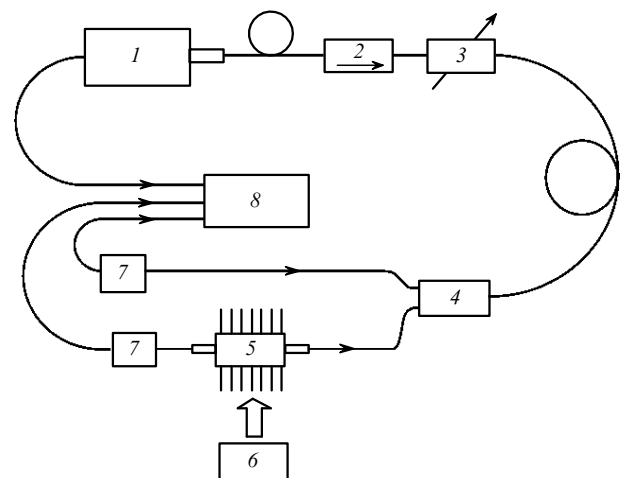


Рис.1. Схема измерений: 1 – BroadSweeper-840; 2 – оптический изолятор; 3 – перестраиваемый оптический аттенуатор; 4 – волоконный разветвитель; 5 – ПОУ-модуль; 6 – контроллер Pilot-4; 7 – оптические измерители мощности; 8 – система регистрации.

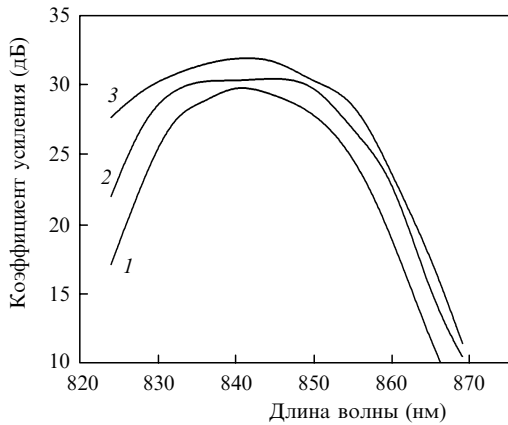


Рис.2. Спектр оптического усиления малого сигнала при токах инжекции 150 (1), 220 (2) и 280 мА (3).

показывают, что уже при умеренной накачке (150 мА) усиление в спектральном максимуме достигает 30 дБ. С увеличением тока инжекции усиление растет, а спектральная полоса контура  $G(\lambda)$  уширяется. При токе 280 мА она составляет 25 нм по уровню  $-3$  дБ и более 40 нм по уровню  $-10$  дБ.

На рис.3 представлены передаточные характеристики ПОУ при тех же токах инжекции и при входных сигналах на длине волны 845 нм вблизи спектрального максимума усиления. Кривые обрываются в точках, где полная выходная мощность (в полосе входного сигнала и в полосе усиленного спонтанного излучения) достигала 50 мВт (17 дБм). Наибольшая спектральная «чистота» выходного сигнала (высокое значение SMS) достигается при глубоком насыщении усиления и соответствующем снижении суперлюминесцентного «пьедестала». Спектры выходного излучения регистрировались с помощью оптического спектрального анализатора ANDO AQ6317B, который при разрешении 0.01 нм и указанном уровне оптической мощности обладает динамическим диапазоном более 50 дБ. Величина SMS определялась как превышение узкополосного спектрального максимума на длине волны входного сигнала над суперлюминесцентным «пьедесталом».

На рис.4,а представлены зависимости рабочих токов ПОУ, обеспечивающих выходную мощность 25 и 50 мВт,

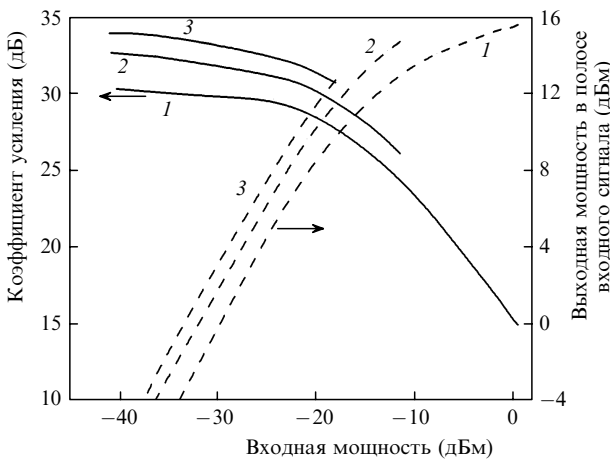


Рис.3. Передаточные характеристики ПОУ при различных мощностях входного сигнала на длине волны 845 нм и токах инжекции 150 (1), 220 (2) и 280 мА (3).

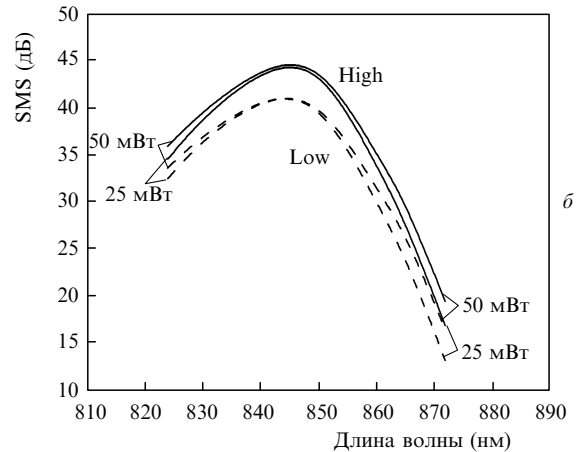
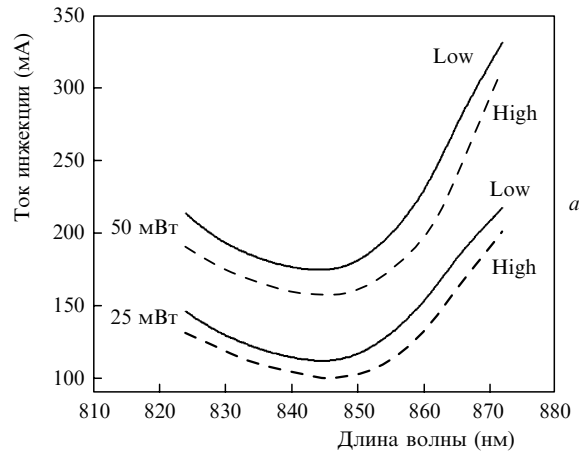


Рис.4. Зависимости от длины волны токов инжекции ПОУ (а), обеспечивающих выходную мощность 25 и 50 мВт, и соответствующие зависимости SMS (б) при  $P_{in} \sim 0.7$  мВт (Low) – сплошные линии и  $P_{in} \sim 2.0$  мВт (High) – штриховые.

от длины волны входного сигнала. При проведении этих измерений из схемы исключались аттенуатор 3 и разветвитель 4. Сигнал с выхода оптического изолятора 2 (потери около 1.5 дБ) подавался непосредственно на вход ПОУ 5. На рис.4,б изображены соответствующие спектральные зависимости SMS( $\lambda$ ). В длинноволновой области полосы перестройки ( $\lambda > 860$  нм) данная система лазер–усилитель не представляет практического интереса. В этом спектральном диапазоне высокая выходная мощность реализуется за счет большого вклада суперлюминесцентного излучения. Что касается диапазона 825–860 нм, то, как видно из приведенных зависимостей, при выходной мощности 50 мВт SMS превышает 35 дБ. Это меньше собственной SMS лазера, но достаточно для многих практических применений. Таким образом, разработанный ПОУ-модуль (предварительное наименование – SOA-382-HP) позволяет повысить выходную мощность перестраиваемого лазера BroadSweeper-840 более чем на порядок, сохранив в целом его уникальные спектральные параметры.

ПОУ в режиме насыщения усиления потенциально более надежен, чем СЛД той же конфигурации, излучающий ту же выходную мощность, т. к. при одинаковых лучевых нагрузках на выходную грань кристалла первый работает при меньшем уровне накачки и меньшей концентрации неравновесных носителей в активном слое. Результаты предварительных ресурсных испытаний подобной МОРА-системы приведены ниже.

Общеизвестно, что мощные СЛД и ПОУ весьма чувствительны к паразитной оптической обратной связи. МОРА-система с выходным ПОУ в режиме насыщения усиления свободна от этого недостатка. Обратная связь, даже значительная, может слегка исказить выходной сигнал, но катастрофическая оптическая деградация, связанная с пробоем входной грани ПОУ, исключена.

#### 4. Оптический усилитель мощности Booster-840

На основе разработанного ПОУ-модуля был изготовлен прототип оптического усилителя мощности (предварительное наименование – Booster-840). Его внешний вид и схема представлены на рис.5. Усилитель собран в стандартном корпусе Schroff HF-Tubus с питанием от источника постоянного тока напряжением 9 В. Исследованы две модификации усилителя: на основе изотропного ОВС и ОВС типа Panda. На входе и выходе схемы использованы проходные разъемы FC/APC 1. На входе ПОУ 5 находится оптический изолятор 3 и контроллер поляризации 4 (только в схемах с изотропным ОВС). Особенности устройства являются система автоматического контроля мощности (АКМ) и система защиты, блокирующая ток инжекции ПОУ в отсутствие входного сигнала. Работа этих систем обеспечивается модифицированным контроллером Pilot-4М 8, на который поступают сигналы с фотодиода 7 (с волоконного разветвителя 2) и с монитора 6.

Первоначально это устройство целенаправленно разрабатывалось как усилительная приставка к лазеру BroadSweeper-840. Порог отключения системы защиты устанавливался на уровне 0.5 мВт, а система АКМ поддерживала выходную мощность на уровне 50 мВт. (Обе эти величины регулируются). Осциллограммы на рис.6 иллюстрируют работу данной МОРА-системы в режиме линейного свипирования длины волны в полосе 825–860

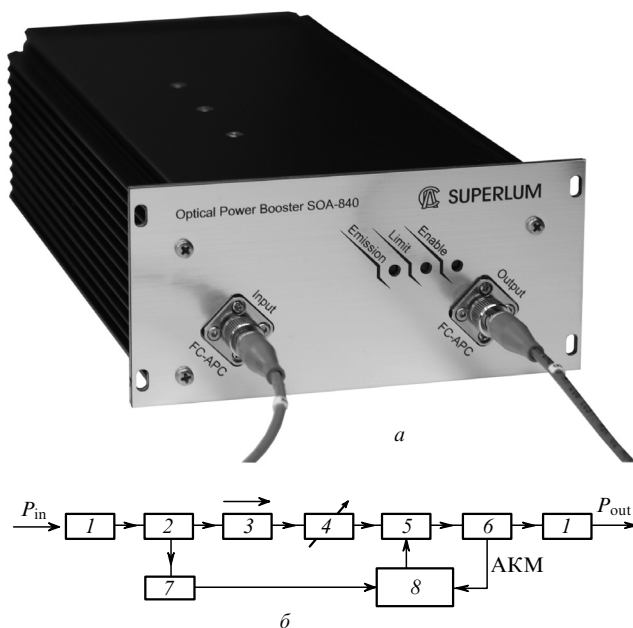


Рис.5. Внешний вид (а) и схема (б) оптического усилителя Booster-840: 1 – одномодовый оптический разъем FC/APC; 2 – волоконный разветвитель (95:5); 3 – широкополосный волоконный изолятор; 4 – контроллер поляризации (применяется в случае изотропных ОВС); 5 – SOA-382-NP; 6 – волоконный монитор типа ОРМ-1 (98:2); 7 – фотодиод; 8 – контроллер Pilot-4М.

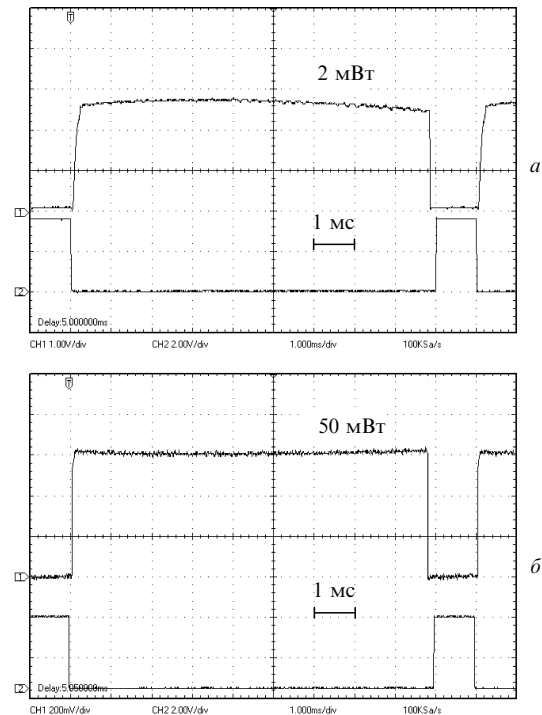


Рис.6. МОРА-система, состоящая из лазера BroadSweeper-840 и усилителя Booster-840. Осциллограммы входного (а) и выходного (б) сигналов (диапазон свипирования 825–860 нм, частота свипирования 150 Гц, нижние осциллограммы – синхримипульсы).

нм с частотой 150 Гц, что соответствует скорости спектральной перестройки  $6 \times 10^3$  нм/с.

Позже была исследована МОРА-система с маломощным СЛД-модулем в качестве задающего генератора и прототипом Booster-840 (модель с использованием изотропного ОВС) в качестве выходного усилителя мощности. В результате был создан источник мощного (50 мВт на выходе ОВС) и достаточно широкополосного (FWHM = 12 нм) излучения с центральной длиной волны 850 нм. Исследования показали, что эти параметры очень слабо зависят от выходных характеристик СЛД, от которого требуются только достаточно широкий спектр излучения, перекрывающий полосу усиления ПОУ, и достаточ-

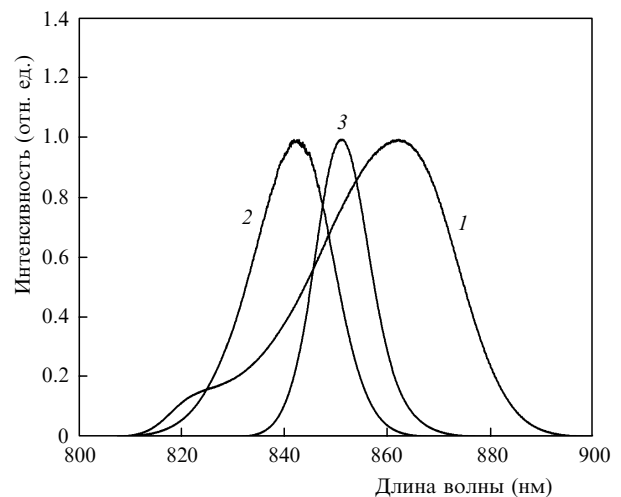


Рис.7. МОРА-система из SLD-371 и Booster-840. Спектры излучения задающего СЛД (1), ПОУ в режиме СЛД (2) и МОРА-системы (3) при непрерывной мощности 50 мВт на выходе ОВС.

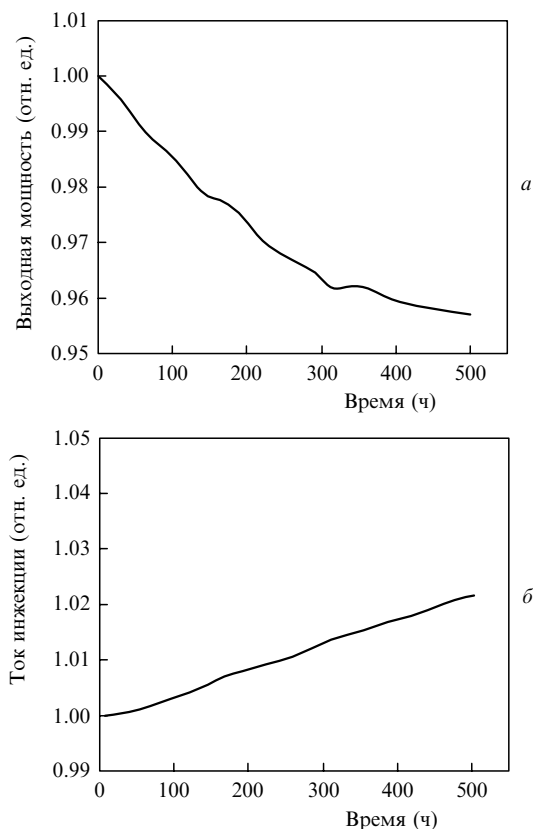


Рис.8. Хронограммы предварительных ресурсных испытаний МОРА-системы в режимах АКТ (а) и АКМ (б) при непрерывной выходной мощности 50 мВт.

ная для насыщения ПОУ выходная мощность порядка 1 мВт. На рис.7 показан спектр излучения СЛД, спектр суперлюминесценции ПОУ в отсутствие входного сигнала при отключенной системе защиты и спектр выходного излучения МОРА-системы в режиме АКМ. Указанные выходные характеристики системы реализуются при умеренном токе инжекции ПОУ (около 165 мА). Уместно отметить, что на выходе ОВС мощность серийно выпускаемых суперлюминесцентных источников излучения данного спектрального диапазона не превышает 30 мВт.

Сделанные выше замечания о потенциально высокой надежности и защищенности от паразитной обратной связи в полной мере относятся и к данной МОРА-системе, предварительные ресурсные испытания которой проводились в два этапа. В течение первых 500 ч система АКМ была отключена, и ПОУ работал при стабилизированном токе инжекции 167 мА (режим АКТ). В начале испытаний наблюдался спад выходной мощности со

скоростью около 0.5 % в сутки. Приблизительно через 300 ч этот процесс замедлился (рис.8,а). Такое поведение типично для многих ЛД и СЛД. Следующие 500 ч система работала в режиме АКМ с выходной мощностью 50 мВт через ОВС. При этом наблюдался приблизительно линейный рост тока инжекции ПОУ со скоростью около 0.1 % в сутки (рис.8,б). Напомним, что активные элементы, подобные использованному в данном ПОУ, в режиме СЛД при той же выходной мощности продемонстрировали достаточно высокую надежность. При этом их рабочий ток инжекции составлял около 400 мА. Согласно приведенным данным срок службы рассматриваемой МОРА-системы составляет более  $3 \times 10^4$  ч. Для практических применений, не требующих столь продолжительного срока службы (свыше трех лет круглосуточной работы), эту величину в разумных пределах можно «разменять» на более высокую выходную мощность.

## 5. Заключение

Разработан и исследован прототип высокоэффективного ПОУ-модуля для спектрального диапазона 820–860 нм. Его коэффициент усиления слабого сигнала (из ОВС в ОВС) может превышать 30 дБ. Продемонстрирована высокая надежность ПОУ при непрерывной мощности до 50 мВт на выходе ОВС. Исследованы два типа МОРА-систем, в которых разработанный ПОУ используется в качестве выходного усилителя мощности.

Авторы выражают признательность В.Дрекслеру за инициирование проведенной разработки и А.Т.Семенову за внимание и поддержку. Работа частично поддержана Федеральным агентством по образованию (проект 2.1.1.195).

1. Growe J.W., Ahearn W.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-2** (8), 283 (1966).
2. Oraevski I.N., Popov Yu.M., Strakhovski G.M. *Phys. Stat. Sol.*, **32** (1), 55 (1969).
3. Елисеев П.Г. *Квантовая электроника*, **32** (12), 1085 (2002)
4. Connelly M.J. *Semiconductor optical amplifiers* (Kluwer Acad. Publ., 2004).
5. Goldberg L., Mehuys D., Surette M.R., Hall D.C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (6), 2028 (1993).
6. Gerald F. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **7** (12), 111 (2001).
7. Зубанов А.В., Успенский М.Б., Шишкин В.А. *Квантовая электроника*, **35** (5), 445 (2005).
8. Лобинцов А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **38** (7), 661 (2008).
9. Андреева Е.В., Магдич Л.Н., Мамедов Д.С., Руенков А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 324 (2006).