

# Узкополосные двухпроходные суперлюминесцентные диоды с длиной волны излучения 1060 нм

А.А.Лобинцов, М.В.Перевозчиков, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович

*Экспериментально показано, что двухпроходные суперлюминесцентные диоды (СЛД) с внешними спектрально-селективными отражателями на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) позволяют получить выходное излучение с шириной спектра в диапазоне 0.1–1.0 нм, что на 1–2 порядка меньше, чем у традиционных СЛД, и значительно больше, чем у одночастотных полупроводниковых лазеров. Их оптическая мощность на выходе одномодового волоконного световода достигала 5.0–8.0 мВт и могла быть увеличена до 50 мВт с помощью полупроводникового оптического усилителя.*

**Ключевые слова:** суперлюминесцентный диод, полупроводниковый оптический усилитель, одномодовый волоконный световод, волоконная брэгговская решетка.

## 1. Введение

Временную когерентность оптического излучения принято характеризовать длиной когерентности  $L_{\text{coh}}$ . Эта величина, соответствующая оптической разности хода, при которой видность интерференционной картины падает в два раза, обратно пропорциональна полуширине спектра излучения  $\Delta\lambda$ . Для спектральных линий гауссовой формы

$$L_{\text{coh}} = 0.44\lambda^2 / \Delta\lambda = 0.44c / \Delta\nu, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – центральная длина волны излучения;  $c$  – скорость света;  $\Delta\nu$  – спектральная полуширина в частотном представлении.

Для лазерных диодов (ЛД) максимальная величина  $\Delta\lambda$  определяется шириной полосы оптического усиления, которая обычно составляет десятки нанометров (единицы терагерц). Именно такими ширинами спектральных линий обладают СЛД, представляющие собой ЛД с предельно низкой добротностью резонатора. Их длина когерентности  $L_{\text{coh}}$  по порядку величины составляет 10 мкм. Снизу  $L_{\text{coh}}$  ограничивается достижимой добротностью лазерного резонатора и степенью стабилизации многочисленных факторов, влияющих на смещение и уширение спектральной линии. ЛД со сложными внешними резонаторами, используемые в квантовых стандартах частоты и некоторых фундаментальных исследованиях, могут иметь  $\Delta\nu < 1.0$  Гц, что соответствует  $L_{\text{coh}} > 10^5$  км. Таким образом, диапазон достижимых значений  $L_{\text{coh}}$  перекрывает 12 порядков. Существуют различные

способы контролируемого уширения и сужения спектральной линии излучения ЛД [1], однако в указанном диапазоне значений  $L_{\text{coh}}$  есть интервалы, до сих пор технически не реализованные.

В частности, для решения некоторых задач спектроскопии и интерферометрии требуются источники достаточно яркого излучения со спектральной шириной линии от десятых долей до единиц нанометров. Похожие требования иногда предъявляются к генераторам «затравочного» излучения в мощных твердотельных и волоконных лазерных системах. В последнем случае, кроме того, обычно нужна амплитудная модуляция излучения без искажения его спектра. Очевидным путем получения таких  $\Delta\lambda$  является использование СЛД с теми или иными выходными спектральными фильтрами, обладающими требуемой полосой пропускания (отражения). К сожалению, такой путь малоэффективен, т. к. при этом полезно используется лишь малая доля (1%–10%) выходной оптической мощности СЛД.

Хорошо известно, что при подаче на вход полупроводникового оптического усилителя (ПОУ) достаточно мощного спектрально согласованного узкополосного сигнала в спектре выходного излучения доминируют фотоны с частотами, лежащими в полосе входного сигнала. При насыщении усиления яркость соответствующего спектрального пика может на 3–4 порядка превышать яркость суперлюминесцентного пьедестала [2]. Аналогичный эффект наблюдается и для двухпроходных СЛД, если их внешний отражатель обладает спектральной селективностью. В настоящей работе в качестве таких отражателей были использованы волоконные брэгговские решетки (ВБР), при записи которых можно с высокой точностью обеспечить требуемые характеристики спектра отражения [3].

## 2. Экспериментальные образцы

Использовались однопроходные ПОУ с максимумом усиления вблизи  $\lambda = 1060$  нм с активными элементами на

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

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

основе двухслойной квантоворазмерной гетероструктуры в системе InGaAs/GaAlAs/GaAs, подробно описанные в [4, 5]. Исследованные образцы ПОУ были собраны в корпусах типа Butterfly с входными/выходными одномодовыми волоконными световодами (ОВС) двух типов: Corning Pure Mode 780 (изотропные) и Corning PANDA 850 (с сохранением поляризации). На этих ОВС методом интерференционной УФ засветки излучением второй гармоники аргонового лазера (244 нм) [6] были записаны ВБР с резонансным отражением на длине волны около 1063 нм. Пиковые значения коэффициентов отражения составляли около 5.0 %. Эта величина была выбрана в результате компромисса между обеспечением достаточно высокой спектральной селективности отражателей и получением достаточно высокого порога самовозбуждения двухпроходных СЛД, связанного с ненулевым остаточным отражением на их выходных гранях. Полуширина спектрального контура коэффициента отражения  $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$  составляла у различных образцов ВБР 0.5–3.0 нм.

При измерении указанных спектральных параметров ВБР использовался перестраиваемый лазер BroadSweeper-1060-01. Прототип этого прибора с аналогичным ПОУ в качестве активного элемента и перестраиваемым акустооптическим фильтром во внешнем оптоволоконном резонаторе описан в [5]. В законченном виде он обладает следующими основными техническими характеристиками.

Центральная длина волны излучения (нм) .....	1060
Выходная оптическая мощность (мВт)	
режим LOW .....	1.0
режим HIGH .....	5.0
Максимальный диапазон спектральной перестройки (нм)	
режим LOW .....	65
режим HIGH .....	60
Спектральная полуширина линии генерации (нм) .....	0.05
Степень поляризации излучения (%) .....	более 98
Степень подавления побочных мод (SMS) (дБ) .....	55

Спектральная перестройка может осуществляться вручную с шагом от 0.05 нм или в режиме линейного свипирования со скоростью до  $10^4$  нм/с. Кроме того, имеется режим, в котором переключение между двумя выбранными длинами волн происходит с заданной частотой. Во всех режимах перестройки работает система автоматического контроля выходной мощности, поддерживающая постоянный уровень мощности с погрешностью около 1 %.

На рис.1 представлен спектр пропускания одного из образцов ВБР, записанный с шагом 0.2 нм. Подобные спектры позволяют с достаточной точностью определить основные параметры контура оптического отражения ВБР. Как известно, у строго периодических ВБР кроме центрального пика в спектре отражения имеются меньшие на порядок и более побочные максимумы [3]. Используемая методика измерений обладала недостаточной для регистрации этих максимумов точностью. Однако, забегая вперед, скажем, что они отчетливо проявились в спектре выходного излучения двухпроходных СЛД.

Отрезки ОВС с записанными ВБР присоединялись к одному из световодов ПОУ с помощью сварочного аппарата FUJIKURA FSM-40F. Вносимые при этом потери

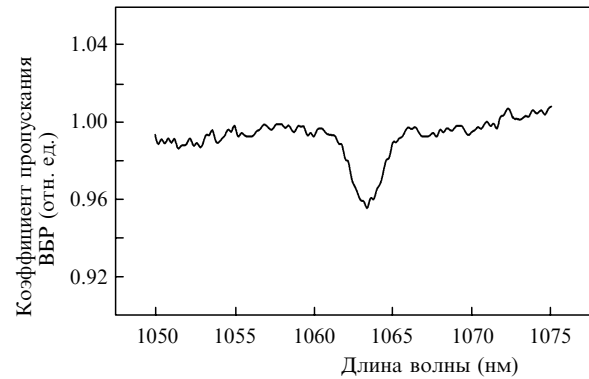


Рис.1. Спектр пропускания ВБР, записанный с помощью перестраиваемого лазера BS-1060-01.

не превышали 0.1 дБ. Измерения проводились в непрерывном режиме инжекции в условиях термостабилизации ПОУ при 25 °С.

### 3. Результаты экспериментов

На рис.2 представлены ватт-амперные характеристики СЛД, работающего в режиме обычного однопроходного диода и в двухпроходном режиме. Использование ВБР-отражателя увеличивает внешнюю квантовую эффективность в 1.5–2.0 раза. При этом спектр выходного излучения сильно деформируется (рис.3). В нем наблюдается узкий пик, значительно превышающий суперлюминесцентный пьедестал. Полуширина этого пика FWHM  $\Delta\lambda_c$  определяется полосой отражения ВБР и усилением ПОУ (уровнем его накачки). Кроме главного пика наблюдаются слабые побочные, обусловленные своим появлением вышеупомянутым максимумом в спектре отражения ВБР. По аналогии с лазерами далее мы будем обозначать превышение главного максимума над побочными аббревиатурой SMS. С ростом тока инжекции полуширина пика уменьшается, а SMS возрастает, причем тем сильнее, чем уже полоса  $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ . Соответствующие зависимости для  $\Delta\lambda_{\text{FBG}} = 3.0$  и 0.5 нм представлены на рис.4. В принципе, возможно изготовление аперодических ВБР, в спектре отражения которых отсутствуют побочные максимумы [7, 8]. Использование таких ВБР позволило бы значительно увеличить величину SMS. Однако для их записи необходимо изготовление прецизион-

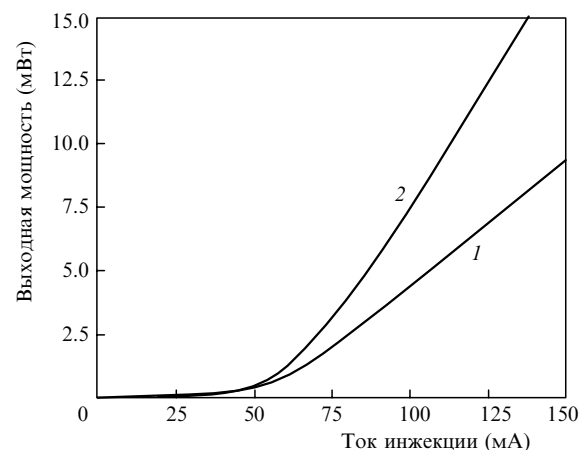


Рис.2. Ватт-амперные характеристики ПОУ в режиме однопроходного СЛД (1) и двухпроходного СЛД с ВБР-отражателем (2).

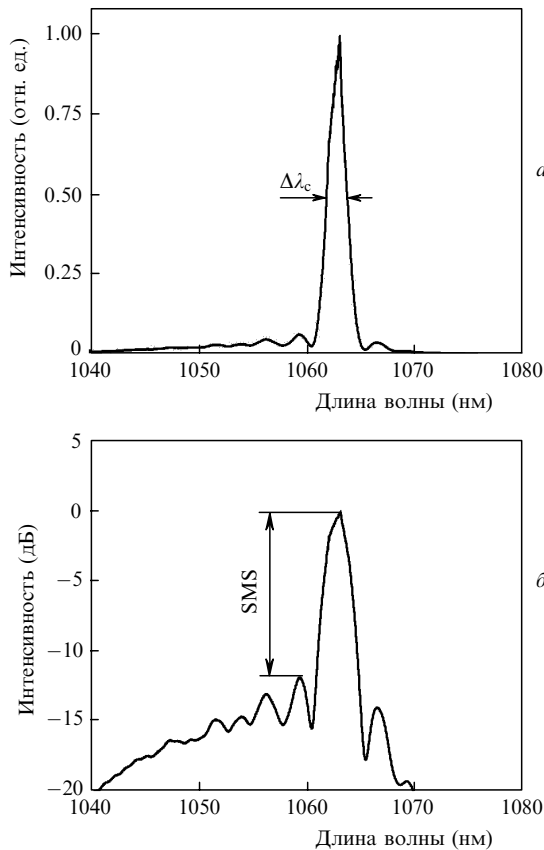


Рис.3. Спектры выходного излучения двухпроходного СЛД ( $\Delta\lambda_{\text{FBG}} = 1.5 \text{ нм}$ ,  $I = 80 \text{ мА}$ ) в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах.

ной дорогостоящей маски, что оправданно только в случае массового выпуска рассматриваемых приборов.

Известно, что даже традиционные однопроходные СЛД, у которых эффективное отражение на обоих торцах активного канала максимально подавлено, весьма чувствительны к паразитным обратным связям [9]. У исследуемых образцов эффективный коэффициент отражения от ВБР с учетом ввода/вывода в стыковочном узле ПОУ составлял около 1 %, что приблизительно на два порядка больше, чем на торце обычного СЛД. Вследствие этого данные двухпроходные СЛД очень чувствительны к паразитным отражениям выходного излучения, и при их практическом использовании следует применять выходные оптические изоляторы. К счастью, в отличие от изоляторов для видимого и ближнего ИК диапазонов спектра, оптические оптоволоконные изоляторы на  $\lambda = 1060 \text{ нм}$  миниатюрны и относительно дешевы. Однако и в отсутствие внешних обратных связей с ростом оптического усиления (тока инжекции) эти двухпроходные СЛД склонны к «вялому» самовозбуждению из-за вышеупомянутого остаточного отражения на выходном торце. Это не приводит к излому ватт-амперной характеристики, но форма центрального спектрального максимума вместо колоколообразной становится изрезанной. У исследованных образцов порог самовозбуждения составлял 80–95 мА, а выходная оптическая мощность, при которой сохранялся гладкий спектр излучения, достигала 5–8 мВт. Такие излучающие модули могут найти практическое применение.

Для решения некоторых технических задач требуется значительно большая выходная мощность. Например, по оценкам специалистов фирмы Continuum Inc., для

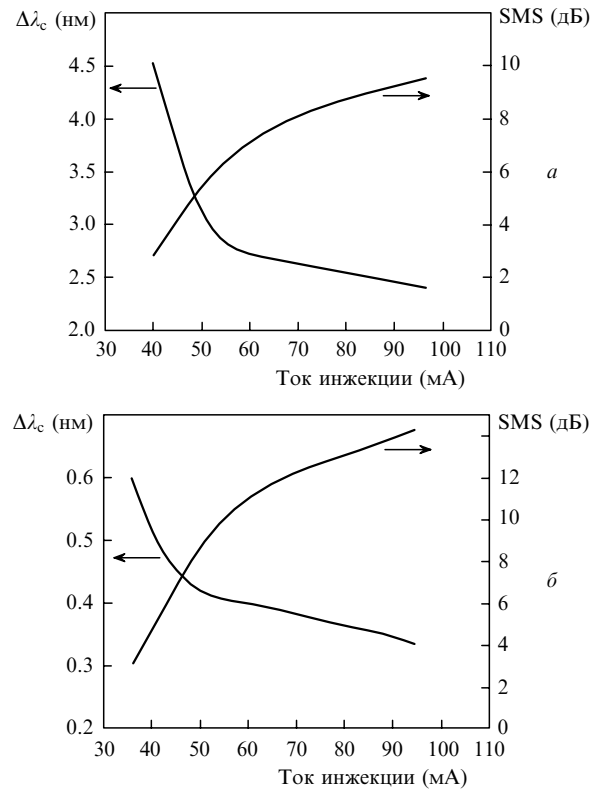


Рис.4. Зависимости полуширины главного спектрального максимума  $\Delta\lambda$  (FWHM) и его превышения над побочными максимумами (SMS) от тока инжекции двухпроходного СЛД с  $\Delta\lambda_{\text{FBG}} = 3.0$  (а) и  $0.5 \text{ нм}$  (б).

одной из разрабатываемых мощных лазерных систем на основе YAG : Nd требуется малошумящий генератор затравочного излучения с длиной волны 1063 нм, шириной спектра 0.3 нм и мощностью на выходе ОВС 30 мВт. Решение подобной задачи очевидным образом требует использования еще одного ПОУ в качестве выходного усилителя, т. е. построения системы задающий генератор + усилитель мощности (МОРА). При этом двухпроходный СЛД, выполняющий роль задающего генератора, может работать при умеренной накачке – значительно ниже порога самовозбуждения.

Схема такого устройства изображена на рис.5. Были исследованы два лабораторных макета МОРА – с узкополосной и широкополосной ВБР. Выходные характеристики соответствующих задающих генераторов (ВБР и ПОУ1) представлены на рис.4. Все оптические соединения были выполнены с использованием ОВС, сохраняющих поляризацию. Оптоволоконный изолятор PMIS10P вносил в прямом направлении потери около 1.5 дБ, а в обратном обеспечивал ослабление более 30 дБ. Питание и термостабилизация обоих ПОУ осуществлялись контроллером PILOT-4. При необходимости ПОУ2 может

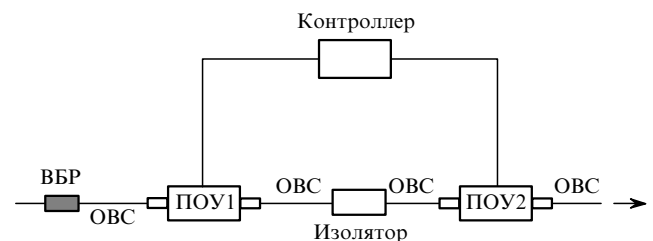


Рис.5. Схема МОРА.

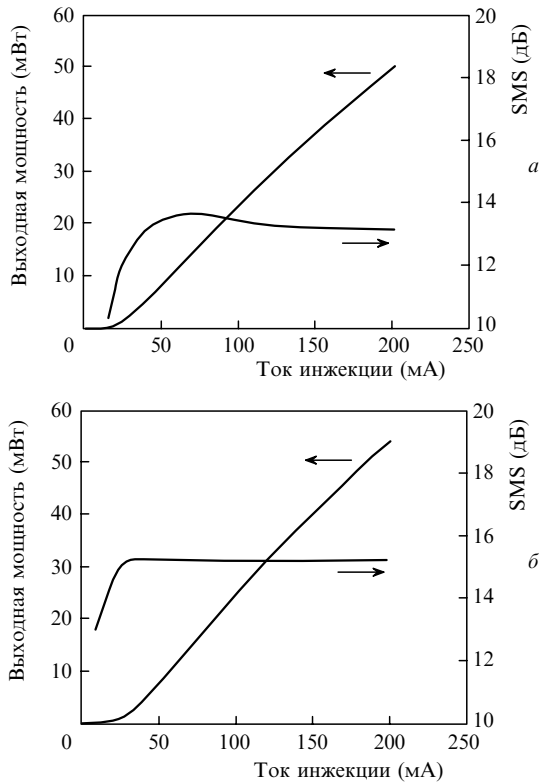


Рис.6. Выходные характеристики МОРА с задающими генераторами (двухпроходными СЛД) с  $\Delta\lambda_{\text{FBG}} = 3.0$  (а) и  $0.5$  нм (б).

выполнять роль амплитудного модулятора. В этом случае следует использовать модифицированную модель данного контроллера, которая обеспечивает требуемый импульсный режим инжекции.

Как уже отмечалось, все измерения проводились в режиме непрерывной накачки обоих ПОУ. На рис.6 представлены зависимости основных выходных характеристик исследованных макетов МОРА от тока инжекции сигнала (на выходе оптического изолятора) составляла 4.0 мВт. С ростом тока инжекции выходная мощность монотонно возрастала. В данном исследовании мы ограничились уровнем 50 мВт, что соответствует плотности мощности на выходной грани ПОУ около  $2 \times 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Эти значения приблизительно в два раза ниже максимально достижимого уровня, определяемого перегревом ПОУ. Следует отметить, что катастрофической деградации этих приборов не наблюдалось. Полуширина центрального пика  $\Delta\lambda_c$  и значение SMS, определяемые спектром входного сигнала, при увеличении тока инжекции ПОУ быстро достигают максимума и в дальнейшем изменяются слабо, составляя 2.0 нм, 13 дБ и 0.3 нм, 15 дБ при  $\Delta\lambda_{\text{FBG}} = 3.0$  и 0.5 нм соответственно.

Для практических применений важной спектральной характеристикой является доля выходной мощности, сосредоточенная в центральном пике:

$$K_s = \int_{\lambda_c - \Delta\lambda_c}^{\lambda_c + \Delta\lambda_c} S(\lambda) d\lambda / \int_{-\infty}^{+\infty} S(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где  $S(\lambda)$  – спектральное распределение интенсивности выходного излучения;  $\lambda_c$  – центральная длина волны.

Величина  $K_s$  у входных сигналов составляла  $\sim 0.7$  при  $\Delta\lambda_{\text{FBG}} = 3.0$  и  $\sim 0.4$  при  $\Delta\lambda_{\text{FBG}} = 0.5$  нм, на выходе МОРА – соответственно  $\sim 0.90$  и  $\sim 0.65$ , т.е. большая часть выходной мощности была сконцентрирована в узком центральном пике.

Важным достоинством этого устройства является его слабая чувствительность к оптической обратной связи, что обусловлено глубоким насыщением усиления выходного ПОУ в рабочем режиме. Случайная обратная связь может повлиять на выходную мощность излучения или исказить его спектр, но не может привести к деградации ПОУ. В силу этого отсутствует необходимость использования выходного оптического изолятора.

#### 4. Заключение

Экспериментально показано, что использование ВБР в качестве спектрально-селективных отражателей позволяет реализовать узкополосные СЛД с шириной спектра излучения, определяемой контуром отражения ВБР. Разработаны СЛД-модули с центральной длиной волны 1063 нм и спектральной полушириной от 0.3 до 2.0 нм. Их непрерывная мощность на выходе ОВС достигала 5.0–8.0 мВт. Применение соответствующего ПОУ позволяет увеличить эти значения на порядок и более.

Данные технические решения могут быть перенесены и на другие спектральные диапазоны, для которых разработаны достаточно эффективные СЛД (ПОУ). Вопрос об амплитудной модуляции излучения таких приборов требует отдельного исследования. В принципе, быстрое действие СЛД и ПОУ в качестве амплитудного модулятора составляет  $\sim 1.0$  нс, однако СВЧ характеристики конкретных модулей обычно сильно ограничивают этот параметр.

Авторы выражают признательность А.Т.Семенову за внимание к проведенным исследованиям. Работа частично поддержана Федеральным агентством по образованию (проект 2.1.1.195).

- Deninger A., Kenner T. *Opt. Las. Europ.*, **162**, 30 (2008).
- Shramenko M.V., Andreeva E.V., Mamedov D.S., Shidlovsky V.R., Yakubovich S.D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6079**, 275 (2006).
- Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков С.А., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35** (12), 1085 (2005).
- Лапин П.А., Мамедов Д.С., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **36** (4), 315 (2006).
- Лобинцов А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д., *Квантовая электроника*, **38** (7), 661 (2008).
- Медведков О.И., Королев И.Г., Васильев С.А., *Препринт ИОФ РАН № 6* (М., 2004).
- Albert J., Hill K.O., Malo B., Thriault S., Bilodeau F., Johnson D.C., Ericson L.E. *Electron. Lett.*, **31**, 222 (1995).
- Erdagon T.J. *Lightwave Technol.*, **15**, 1277 (1998).
- Андреева Е.В., Шраменко М.В., Якубович С.Д., *Квантовая электроника*, **37** (5), 443 (2007).