

# Многоканальные сверхширокополосные источники излучения ближнего ИК диапазона для оптической когерентной томографии

М.Войтковский, П.И.Лапин, Д.С.Мамедов, Дж.Дж.Фуджимото, С.Д.Якубович

*Описываются устройство и выходные характеристики двух экспериментальных образцов источников света ближнего ИК диапазона, основанных на суперпозиции излучения нескольких суперлюминесцентных диодов. Первый, трёхканальный, образец с непрерывной выходной оптической мощностью через одномодовый волоконный световод 18 мВт и спектральной полушириной 105 нм оптимизирован для офтальмологической когерентной томографии. Второй, четырёхканальный, образец с центральной длиной волны 870 нм обладает спектральной полосой излучения более 200 нм, что соответствует рекордной длине когерентности – менее 4 мкм.*

**Ключевые слова:** суперлюминесцентный диод, широкополосный оптоволоконный разветвитель, оптическая когерентная томография.

## 1. Введение

Достоинства полупроводниковых источников оптического излучения общеизвестны. Для оптической когерентной томографии (ОКТ) [1, 2] оптимальными источниками излучения являются светоизлучающие модули на основе суперлюминесцентных диодов (СЛД), сочетающие в себе высокую яркость полупроводниковых лазеров и широкий спектр излучения полупроводниковых светоизлучающих диодов, а следовательно, обладающие малой длиной когерентности  $L_c = \lambda^2/\Delta\lambda$ , где  $\lambda$  – центральная длина волны излучения,  $\Delta\lambda$  – ширина спектральной линии.

Суперпозиция излучения двух и более СЛД-модулей с оптоволоконным выходом и со смещёнными, но перекрывающимися спектрами излучения, которая реализуется с помощью широкополосных оптоволоконных разветвителей, – это простой и относительно недорогой метод создания сверхширокополосных источников излучения для ОКТ и других практических применений, в частности оптоволоконных сенсоров.

В 2004 г. двухканальный источник излучения Broad-Lighter-890 со спектральной полушириной 150 нм на основе квантоворазмерных СЛД был испытан в ОКТ-системах [3, 4]. Были получены весьма обнадеживающие результаты: достигнуто осевое разрешение 3.2 мкм при томографии сетчатки человеческого глаза и 2.3 мкм – при анализе кожных слоёв. Данный источник света не опти-

мален для офтальмологии, т. к. излучение длинноволнового крыла его спектра (около 30 % выходной оптической мощности) поглощается глазной жидкостью.

В настоящей работе рассмотрены изготовленные благодаря разработке двух новых типов квантоворазмерных СЛД экспериментальные образцы новых широкополосных источников излучения: трёхканальный прибор с непрерывной выходной мощностью через одномодовый волоконный световод (ОВС)  $P = 18$  мВт, обладающий спектральной полосой 105 нм, которая соответствует полосе прозрачности глазной жидкости, и четырёхканальный прибор с  $P = 6.0$  мВт и рекордно широкой полосой излучения – более 200 нм.

## 2. Выходные характеристики СЛД-модулей

В настоящей работе были использованы шесть типов СЛД-модулей. Все они изготовлены на основе полупроводниковых двухсторонних гетероструктур с отдельным ограничением (РО ДГС), выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Активные каналы СЛД представляли собой гребневидные оптические волноводы шириной 4 мкм, сформированные методом ионного травления через фотолитографическую маску. Для подавления положительной оптической обратной связи использовалось наклонное расположение активных каналов относительно торцевых граней кристалла и нанесение на эти грани диэлектрических антиотражающих покрытий. СЛД монтировались в корпусах DIP или Butterfly вместе с термоэлектрическими микроохлаждателями и терморезисторами, обеспечивающими термостабилизацию. Выходное излучение СЛД вводилось через торцевые микролинзы в ОВС типа Corning Pure Mode HI 780. Для всех СЛД-модулей инъекция тока была постоянной и пространственно однородной. Методика оптимизации конфигурации и рабочих режимов СЛД при разработке комбинированных широкополосных источников излучения описана в [4]. Спектры излучения СЛД, использованных в настоящей работе, представлены на рис.1.

П.И.Лапин, Д.С.Мамедов. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 117454 Москва, п/я 70;  
e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

М.Войтковский, Дж.Дж.Фуджимото. Department of Electrical Engineering and Computer Science, Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA;  
e-mail: jgfujii@mit.edu

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 14 марта 2005 г.

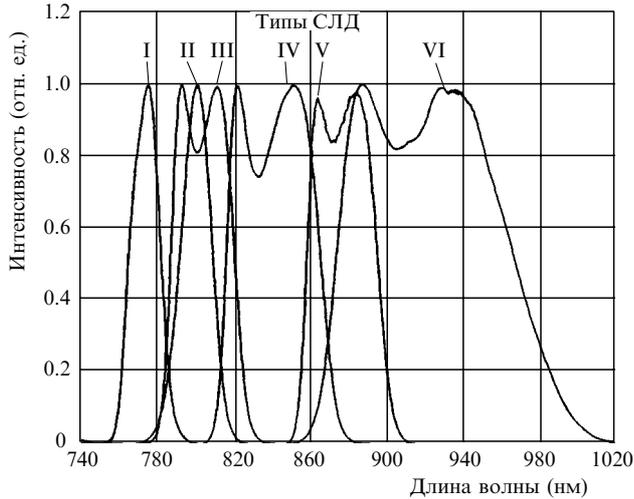


Рис.1. Спектры СЛД, использованных в многоканальных источниках излучения.

В коротковолновом крыле спектра применялись серийные модули SLD-381-HP на основе «объёмных» РО ДГС с квазигансовской формой спектра и центральными длинами волн излучения 775 нм (тип I) и 795 нм (тип II).

Модули типов IV и VI на основе однослойных кванторазмерных гетероструктур (КРС), использованные в приборе BroadLighter-890, подробно описаны в [5–7].

Новый СЛД типа III, созданный в рамках настоящей работы, изготовлен на основе однослойной КРС со ступенчатым оптическим волноводом, подобной использованной для СЛД типа IV [5, 6]. В спектре СЛД типа III наблюдаются два максимума – в областях 790 и 820 нм, которые при определённых условиях могут быть выровнены. При этом СЛД-модуль будет иметь следующие выходные характеристики:  $P = 3.0 - 5.5$  мВт (в зависимости от температуры и длины активного канала),  $\lambda = 803$  нм,  $\Delta\lambda = 35$  нм.

Второй новый СЛД (тип V) основан на КРС с градиентным волноводом, подобной использованной для СЛД типа VI [7]. При выровненных спектральных максимумах он обладает следующими выходными характеристиками:  $P = 9 - 19$  мВт (в зависимости от температуры и длины активного канала),  $\lambda = 875$  нм,  $\Delta\lambda = 38$  нм.

### 3. Комбинированные источники излучения

При изготовлении комбинированных источников излучения применялись оригинальные широкополосные оптоволоконные Y-разветвители [4] на основе ОВС Copling Pure Mode HI 780. Кроме симметричных разветвителей с коэффициентом деления 50 : 50 использовались и асимметричные – с коэффициентом деления 30 : 70. Это дало дополнительную степень свободы при конструировании комбинированных источников.

Схема трёхканального прибора, состоящего из СЛД-модулей типов II, IV, V и разветвителей с коэффициентами деления 50 : 50 и 30 : 70, изображена на рис. 2, а. После оптимизации рабочих режимов СЛД (токов инжекции и температур) этот прибор обеспечивает следующие выходные характеристики:  $P = 18$  мВт,  $\lambda = 840$  нм,  $\Delta\lambda = 105$  нм. Спектр излучения и автокорреляционная функция интенсивности этого комбинированного источника изображены на рис. 3, а, б.

Как известно, глазная жидкость в основном состоит

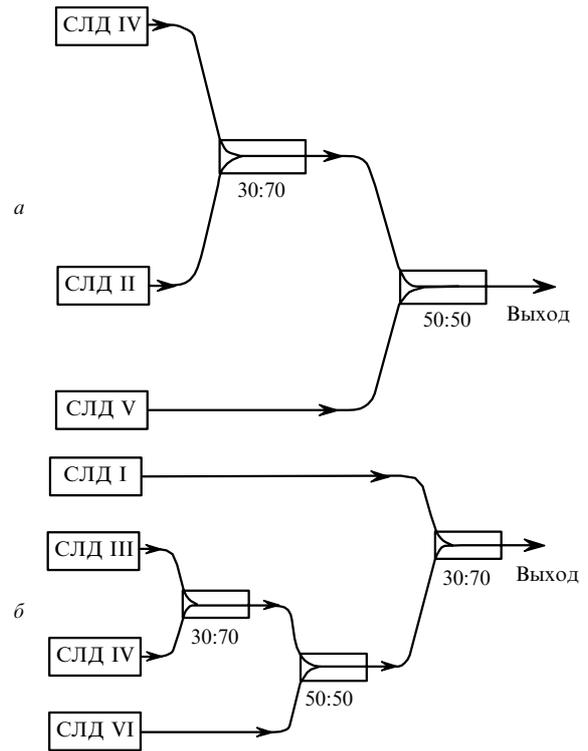


Рис.2. Схемы трёхканального (а) и четырёхканального (б) источников излучения.

из воды. На рис. 3, а показан спектр пропускания слоя воды толщиной 5 см. Можно утверждать, что излучение данного источника может быть полностью использовано в офтальмологических ОКТ-системах. Соответствующие испытания ОКТ-системы высокого разрешения со спектральным фурье-детектированием проведены в Массачусетском технологическом институте. На рис.4 представлено изображение сечения сетчатки человеческого глаза, полученное в результате 8100 осевых сканирований за время 0.3 с. Достигнуто осевое разрешение 3.5 мкм, близкое к разрешению, полученному с помощью источника BroadLighter-890, хотя спектр последнего почти в 1.5 раза шире. Это разрешение приближается к рекордным значениям, достигаемым в ОКТ-системах при использовании в качестве источников широкополосного излучения твердотельных фемтосекундных лазеров с синхронизацией мод. Однако такие источники весьма громоздки, дорогостоящи и сложны в эксплуатации. Кроме того, они обладают достаточно высоким уровнем относительных шумов интенсивности, что приводит к необходимости использования сложных схем двойного балансного детектирования полезного сигнала. Уровень шумов источников излучения на основе СЛД обычно не превышает  $-130$  дБ/Гц в полосе радиочастот, используемых в ОКТ, что позволяет отказаться от указанных схем.

На рис.2, б изображены схемы четырёхканального прибора, в котором использованы СЛД-модули типов I, III, IV, V и разветвители с коэффициентами деления 30 : 70, 50 : 50 и 30 : 70. После оптимальной настройки этот прибор обеспечивал следующие выходные характеристики:  $P = 6$  мВт,  $\lambda = 870$  нм,  $\Delta\lambda = 201$  нм. Соответствующий спектр и автокорреляционная функция интенсивности изображены на рис. 3, в, г. Полученная длина когерентности  $L_c < 4$  мкм является, по нашим сведениям, рекордной для полупроводниковых источников излу-

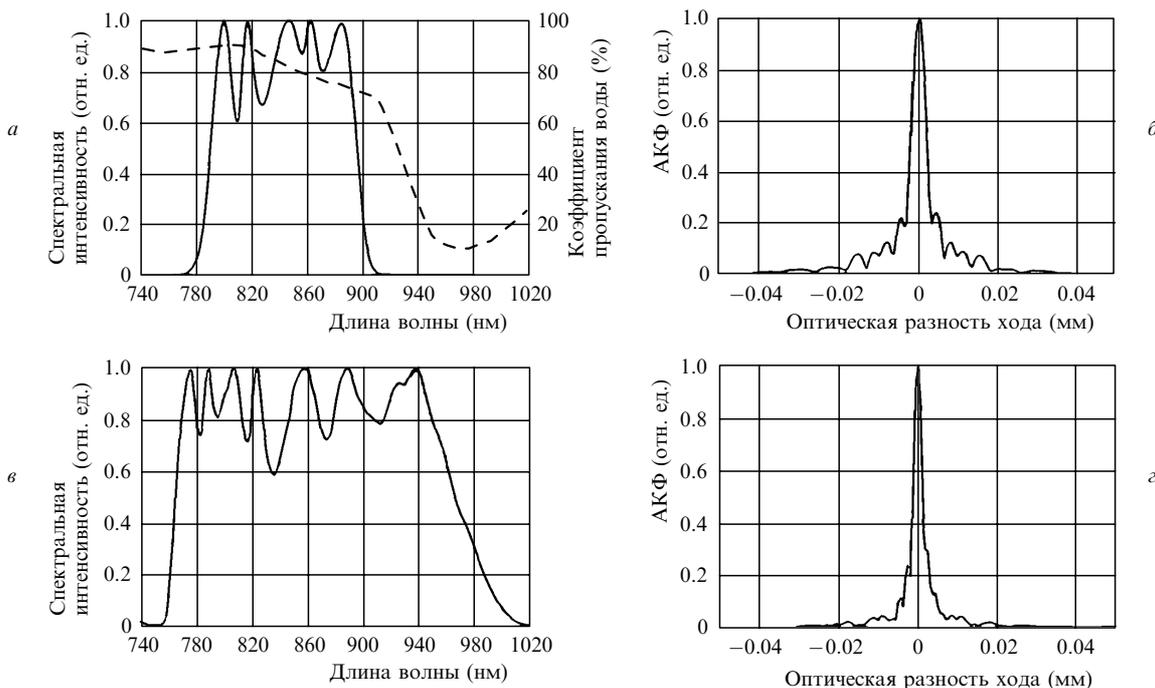


Рис.3. Спектры излучения и автокорреляционные функции интенсивности трёхканального (а, б) и четырёхканального (в, г) источников излучения; штриховой кривой на рис.3,а показан спектр пропускания слоя воды толщиной 5 см.

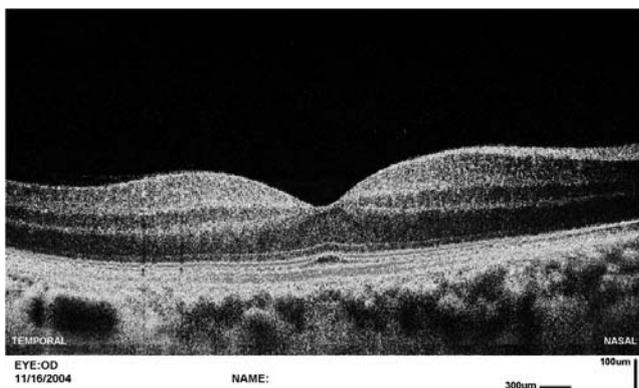


Рис.4. Изображение сечения сетчатки человеческого глаза, полученное в ОКТ-системе с использованием трёхканального комбинированного источника излучения.

чения ближнего ИК диапазона. Использование такого источника в ОКТ-системах позволяет рассчитывать на достижение аксиального разрешения лучше, чем 2 мкм.

В описанных выше приборах, как и в им подобных, изготовленных ранее, использовался ОВС без сохранения поляризации. В последнее время отработана технология изготовления СЛД-модулей с выходными ОВС типа Corning PM-PANDA. При этом обычно ТЕ-мода СЛД распространяется вдоль медленной оси ОВС. Изготовлены первые экспериментальные образцы широкополосных разветвителей на основе того же ОВС. Таким образом, в принципе все приборы серии BroadLighter могут

изготавливаться в модификации, обеспечивающей стабильную поляризацию излучения на выходе, что является существенным шагом вперёд для ряда практических применений.

Итак, нами разработаны прототипы двух новых широкополосных источников излучения ближнего ИК диапазона на основе СЛД. Полоса излучения первого из них, шириной более 100 нм, соответствует спектральному окну прозрачности воды. Второй прибор обладает рекордной для полупроводниковых источников излучения длиной когерентности – менее 4 мкм.

Авторы выражают признательность А.Т.Семёнову за внимание к работе.

1. Huang D., Swanson E.A., Lin C.P., Schuman J.S., Stinson W.G., Chang W., Hee M.R., Flotte T., Gregory K., Puliafito C.A., Fujimoto J.G. *Science*, **254**, 1178 (1991).
2. Fercher A.F., Drexler W., Hitzinger C.K., Lasser T. *Reports on Progress in Phys.*, **66**, 239 (2003).
3. Ко Т.Н., Adler D.C., Fujimoto J.G., Mamedov D., Prokhorov V., Shidlovski V., Yakubovich S. *Opt. Express*, **12** (10), 2112 (2004).
4. 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).
5. Semenov A.T., Batovrin V.K., Garmash I.A., Shidlovsky V.R., Shramenko M.V., Yakubovich S.D. *Electron. Lett.*, **31** (4), 314 (1995).
6. Батоврин В.К., Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Плявенок А.Г., Семенов А.Т., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996).
7. Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **33** (6), 471 (2003).