

# Перестраиваемый низкокогерентный источник света высокой спектральной яркости

В.Р.Шидловский, М.В.Шраменко, С.Д.Якубович

*Экспериментально исследована работа перестраиваемого низкокогерентного источника света высокой спектральной яркости тандемного типа, использующего серийные оптические элементы – суперлюминесцентный диод, полупроводниковый оптический усилитель и объемную дифракционную решетку. Экспериментально получена замечательная комбинация выходных характеристик источника: спектральная плотность мощности – 36 мВт/нм, диапазон перестройки длины волны излучения – 35 нм (834–869 нм), превышение центрального максимума спектра излучения относительно суперлюминесцентного пьедестала – более 20 дБ. Показано, что оптический спектр выходного излучения шириной 1.4 нм обладает гладкой колоколообразной формой с вторичными боковыми максимумами, находящимися ниже уровня суперлюминесцентного пьедестала. Обоснован практический интерес к подобному источнику света для различных прикладных применений.*

**Ключевые слова:** перестраиваемый источник света, квантоворазмерная гетероструктура, суперлюминесцентный диод, полупроводниковый оптический усилитель, дифракционная решетка.

## 1. Введение

Среди огромного многообразия оптических источников света, представленных на рынке оптоэлектроники, следует выделить большое количество приборов, построенных с использованием полупроводниковых суперлюминесцентных диодов (СЛД). Эти диоды, бурное развитие которых обязано прогрессу в технологии роста гетероэпитаксиальных структур, прошли длинный путь совершенствования от простых полупроводниковых приборов с шириной спектра излучения, не превышающей 20 нм, и оптической мощностью в единицы милливатт до мощных широкополосных полупроводниковых источников с уникальными выходными характеристиками [1–3]. Благодаря использованию узкого поперечно-одномодового активного канала шириной несколько микрон, обеспечивающего дифракционную расходимость излучения на выходе полупроводникового кристалла (чипа), стало возможным создание миниатюрного СЛД-модуля с выводом оптического излучения через одномодовый волоконный световод (ОВС). Широкая гамма приборов такого типа сейчас активно используется в различных научных и практических приложениях, требующих низкокогерентных источников света высокой спектральной яркости. Среди основных областей применения следует выделить низкокогерентную интерферометрию, волоконно-оптические датчики различных типов, гироскопию, оптические рефлектометры и др. [4, 5].

В настоящее время на рынке коммерческих оптических приборов появились настоятельные запросы на компактные источники света с относительно узким спектром

излучения (1–2 нм) и высокой спектральной плотностью (более 10 мВт/нм). Возросший интерес к приборам подобного типа проявляют компании, занимающиеся производством технологического оборудования для высокоэффективной резки полупроводниковых пластин и кристаллов (скрайбирование), генными исследованиями в биологии и медицине, разработкой медицинского оборудования для бесконтактного анализа кровотока в организме человека, конструированием приборов для различных лабораторных применений (поляриметров, колориметров, рефрактометров и пр.). Следует отметить, что, помимо высокой спектральной плотности мощности, к такому источнику излучения предъявляется особое требование на форму выходного оптического спектра – она должна быть сглаженной, желательна близкой к колоколообразной, с низким (менее –15 дБ) уровнем боковых вторичных максимумов, не зависеть от уровня выходной оптической мощности и стабильно воспроизводиться в течение всего срока эксплуатации прибора. Дополнительным важным условием является возможность настройки максимума выходного спектра источника на требуемое значение рабочей длины волны.

В некоторых случаях для этих целей могут использоваться полупроводниковые лазеры [6], однако полностью выполнить все вышеизложенные требования с помощью лазеров не представляется возможным. В этой ситуации применение СЛД высокой спектральной яркости может быть оптимальным вариантом для создания требуемого источника оптического излучения. Шагом в этом направлении может служить сообщение о разработке СЛД с шириной спектра 8 нм и спектральной плотностью мощности 12 мВт/нм [7]. Тем не менее разработка и создание специального узкоспектрального СЛД с требуемыми оптическими и мощностными характеристиками является трудной, а подчас и невыполнимой технической задачей. Одним из путей решения этой задачи может быть разработка источника света тандемной конфигурации на базе

В.Р. Шидловский, М.В. Шраменко, С.Д. Якубович. ООО «Оптон», Россия, 119330 Москва, ул. Мосфильмовская, 17Б; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 1 февраля 2021 г.

серийно выпускающихся моделей СЛД путем выделения части спектра излучения шириной 1–2 нм от задающего источника излучения с помощью спектрально-селективного элемента (например, дифракционной решетки или спектрального фильтра) и последующего усиления излучения этой доли спектра до требуемой мощности с помощью лазерного полупроводникового оптического усилителя (ПОУ) [8].

В настоящей работе приводятся результаты разработки одного из вариантов оптической схемы перестраиваемого низкокогерентного источника света высокой спектральной яркости, построенного с использованием стандартных моделей СЛД и ПОУ и объемной дифракционной решетки. Все элементы и детали схемы серийно производятся и доступны для покупки на рынке. В работе детально описывается конфигурация оптической схемы, излагаются спектральные, мощностные и перестроечные характеристики полученного источника оптического излучения.

## 2. Оптическая схема источника света

На рис.1 представлена исследованная оптическая схема перестраиваемого суперлюминесцентного источника, использующая классическую tandemную конфигурацию МОР (Master Oscillator Power Amplifier), изложенную в [9]. Схема состояла из двух основных каскадов – слабого задающего источника света с элементом спектральной фильтрации и мощного выходного оптического усилителя, работающего в режиме оптического бустера.

В качестве задающего источника использовался светоизлучающий модуль из стандартной линейки продукции российской компании «Суперлюм» (модель SLD-381). В качестве активного элемента в модуле был применен полупроводниковый кристалл на основе двухсторонней гетероструктуры с раздельным ограничением элек-

тромагнитного поля и носителей заряда (РО ДГС) в системе (GaAl)As и «объемным» активным слоем толщиной 0.145 мкм. Активный элемент обеспечивал суперлюминесцентное излучение с колоколообразной (квазигауссовой) формой спектра и максимумом на длине волны  $\lambda = 845$  нм. Модуль допускал регулировку выходной оптической мощности до 30 мВт при слабой вариации ширины спектра в диапазоне 13–15 нм (рис.2).

В качестве ПОУ-модуля был использован серийный усилитель SOA-372 («Суперлюм»), в котором применялся полупроводниковый кристалл на основе однослойной квантоворазмерной гетероструктуры (наноструктуры) в системе (GaAl)As с толщиной активного слоя 11 нм, обеспечивающий оптическое усиление более 20 дБ в спектральном диапазоне 820–875 нм. В спектрах собственной суперлюминесценции усилителя наблюдались два спектральных максимума, которые соответствовали квантовым переходам из основной и возбужденной подзон энергетического спектра [3, 10] и амплитуды которых зависели от величины тока инжекции. Полуширина спектра суперлюминесценции при таком токе инжекции, при котором наблюдалось выравнивание спектральных максимумов, составляла 44 нм при выходной оптической мощности 5 мВт (рис.3). Подробное изложение результатов исследований спектральных и мощностных характеристик подобных усилителей можно найти в работе [11].

Ввод и вывод излучения в обоих модулях осуществлялся с помощью сохраняющей поляризацию ОВС типа PANDA PM 850. Светоизлучающие модули были собраны в корпусах типа Butterfly и содержали микроохлаждатели Пельтье и термисторы, используемые для стабилизации рабочей температуры активных элементов. В конструкции светоизлучающих модулей использовались волоконные цилиндрические микролинзы со скошенной торцевой поверхностью, а оси активных волноводов полупроводниковых кристаллов были расположе-

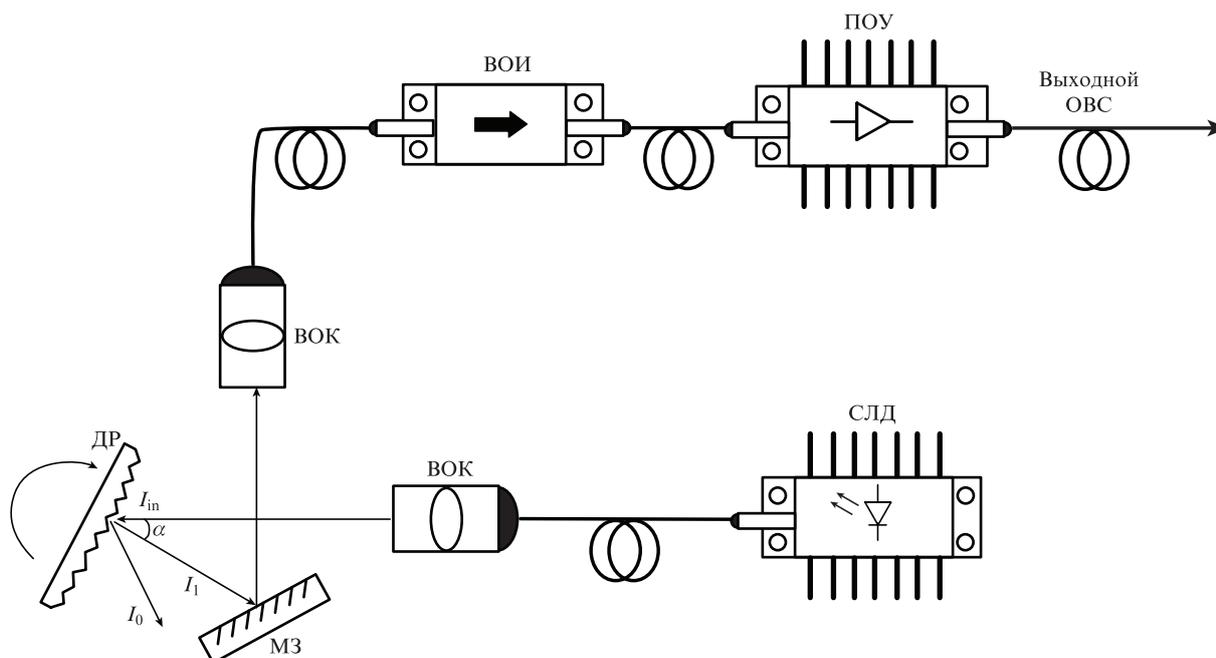


Рис.1. Оптическая схема перестраиваемого суперлюминесцентного источника света: СЛД – суперлюминесцентный диод; ВОК – волоконно-оптический коллиматор; ДР – дифракционная решетка; МЗ – металлическое зеркало; ВОИ – волоконно-оптический изолятор; ПОУ – полупроводниковый оптический усилитель;  $I_{in}$  – интенсивность падающего пучка света;  $I_1$  и  $I_0$  – интенсивности света в первом и нулевом порядках дифракции соответственно. Все отрезки волоконных световодов – ОВС с сохранением поляризации.

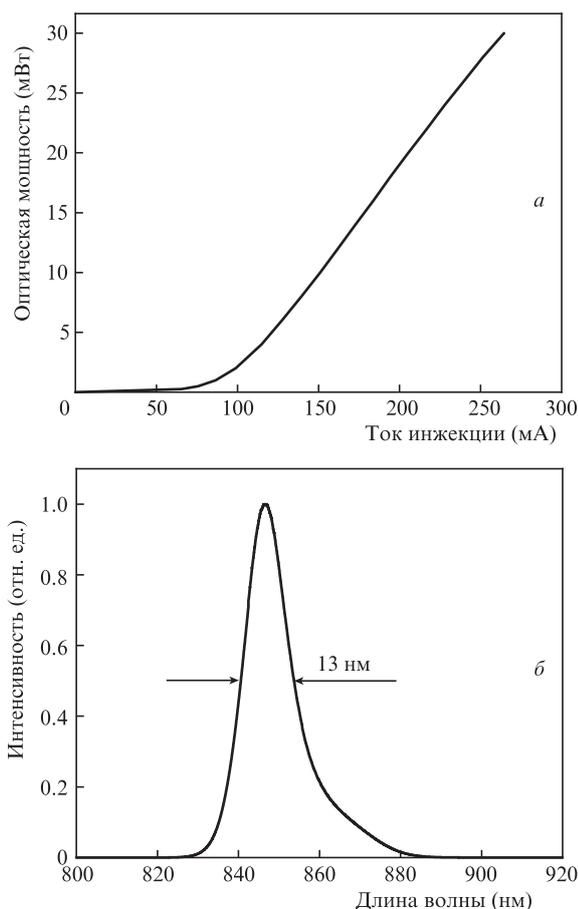


Рис.2. Ватт-амперная характеристика (а) серийного оптического модуля SLD-381 и спектр его излучения при выходной оптической мощности 30 мВт (б).

ны под углом  $7^\circ$  относительно выходных граней, на которые напылялись специальные просветляющие покрытия ( $R \sim 10^{-4}$ ). Благодаря этому удалось достичь низкого (не превышающего 0.5%) уровня собственной модуляции мощности в спектрах излучения модулей. Коэффициент ввода излучения в выходные ОВС был достаточно высоким и находился в диапазоне 50%–70%.

В качестве спектрально-селективного элемента, задающего ширину и форму выходного оптического спектра тандемной схемы источника, использовалась серийная плоская дифракционная решетка нарезного типа GR50-0310 (Thorlabs) с плотностью штрихов 300 штр./мм, которая работала как однопроходный полосовой фильтр с полосой фильтрации от 1 до 1.5 нм для длин волн в области 850 нм. Ширина полосы фильтрации определялась диаметром оптического пучка и числом задействованных в дифракции штрихов решетки, которое также зависело от угла падения пучка на решетку. В настоящей работе диаметр светового пучка составлял 2.2 мм при дифракционной расходимости 0.5 мрад. Пучок формировался волоконно-оптическим коллиматором с асферической линзой с фокусным расстоянием 11 мм, которая имела просветляющее покрытие в рабочем диапазоне длин волн, что обеспечило уровень обратно отраженных сигналов не хуже –40 дБ. Излучение дифрагировавшего пучка на выходе решетки вводилось в оптический коллиматор аналогичного типа. Используемая пара коллиматоров оптимизировалась на этапе производства с целью достижения максимального коэффици-

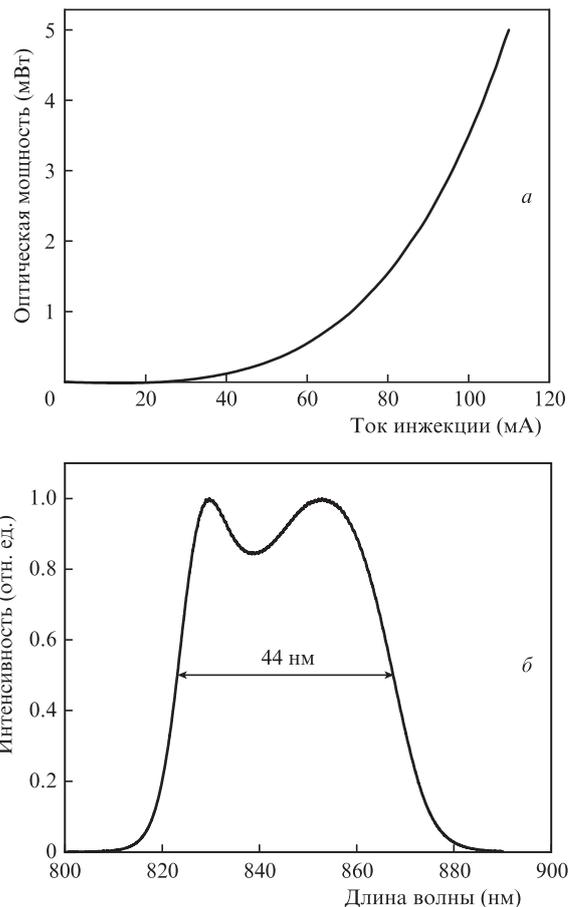


Рис.3. Ватт-амперная характеристика (а) оптического модуля ПОУ SOA-372 и спектр его излучения при токе инжекции 110 мА (б) в режиме собственной суперлюминесценции.

ента передачи между ними на дистанции 140 мм. Полученный коэффициент передачи между коллиматорами составил 85%.

Для ввода излучения дифрагировавшего пучка в выходной коллиматор использовалось компактное плоское металлическое зеркало с золотым отражающим покрытием ( $R = 98\%$ ) и внешним диэлектрическим защитным покрытием, закрепленное в юстируемой оправе. Использование зеркала дало возможность минимизировать угол  $\alpha$  (см. рис.1) между падающим и дифрагировавшим пучками, что позволило избежать чрезмерно «закошенной» по углу ориентации дифракционной решетки, при которой аппаратная функция решетки была бы заметно уже 1.4 нм из-за перекрытия пучком большого числа штрихов решетки. Использование высококачественных оптических оправ с прецизионными регулировками углов поворота и качания для зеркала и выходного коллиматора значительно упростило процедуру ввода излучения в выходной коллиматор, сведя ее к юстировке этих элементов только по угловым координатам. Настройка на требуемую длину волны осуществлялась поворотом дифракционной решетки вокруг оси. Максимальная эффективность дифракции решетки составила 67% на  $\lambda = 845$  нм при ориентации вектора поляризации излучения, падающего на решетку, ортогонально штрихам решетки. Для примененной геометрии оптической схемы ширина аппаратной функции дифракционной решетки составила 1.4 нм, а уровень вторичных спектральных максимумов находился ниже –40 дБ (рис.4).

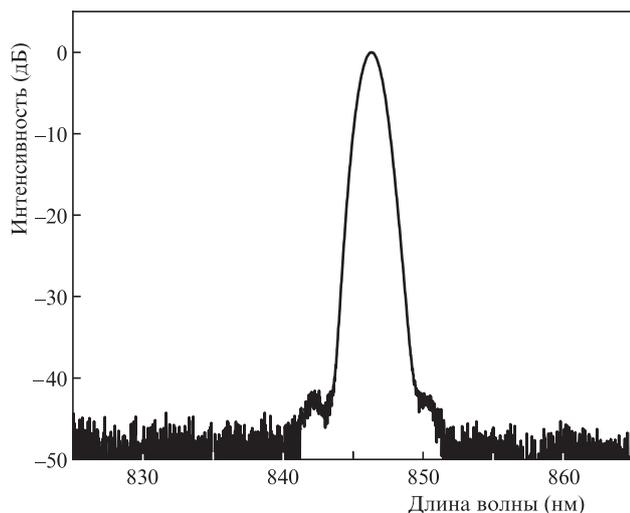


Рис.4. Оптический спектр на выходе дифракционной решетки для пучка света диаметром 2.2 мм.

Между СЛД и ПОУ, с целью исключения появления паразитной оптической связи, был установлен широкополосный волоконно-оптический изолятор с низкими оптическими потерями (менее 1 дБ) и коэффициентом изоляции более 30 дБ. Коэффициент экстинкции ( $10\lg(P_{SL}/P_F)$ ), где  $P_{SL}$  и  $P_F$  – мощности излучения вдоль медленной и быстрой осей ОВС) для оптического излучения на выходе изолятора был достаточно высоким и составил 25 дБ. Все волоконно-оптические элементы схемы были реализованы на основе ОВС с сохранением поляризации типа PANDA, в котором в качестве рабочей оси для выходного излучения использовалась медленная ось. Соединение элементов в единую оптическую схему осуществлялось свариванием с прецизионной ориентацией осей оптических волокон.

### 3. Мощностные, спектральные и перестроечные характеристики источника света

На рис.5 представлены зависимости оптической мощности на выходе ПОУ от тока инжекции в режиме собственной суперлюминесценции и в режиме усиления входного оптического сигнала. Использование задающего СЛД с достаточно высокой (до 2.5 мВт/нм) спектральной плотностью мощности позволило получить оптический сигнал мощностью 1 мВт после дифракционной решетки на выходе из коллиматора при ориентации решетки на максимум спектра излучения СЛД. При таком оптическом сигнале на входе ПОУ максимальное значение усиленной оптической мощности в выходном ОВС составило 50 мВт при токе инжекции 152 мА. Дальнейшее увеличение оптической мощности было ограничено пределом лучевой стойкости выходной грани активного элемента ПОУ и возможностью необратимого ее повреждения вследствие катастрофической оптической деградации.

Как показали исследования [11], входной оптической мощности 1 мВт обычно достаточно для достижения глубокого насыщения оптического усиления ПОУ, при котором усилитель становится малочувствительным к оптическим обратным отражениям на выходе. Вследствие

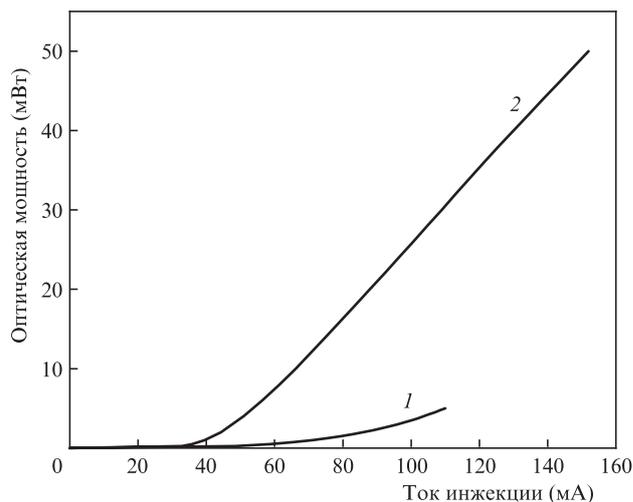


Рис.5. Ватт-амперная характеристика ПОУ в режиме собственной суперлюминесценции (без входного сигнала) (1) и в режиме усиления входного оптического сигнала (2).

этого выходной оптический изолятор может не устанавливаться, что позволяет существенно сэкономить на затратах, связанных с его покупкой и монтажом. Кроме того, исключаются оптические потери полезного оптического сигнала в самом оптическом изоляторе, которые в среднем колеблются от 25% до 40%, а это позволяет реализовать максимально возможную мощность на оптическом выходе схемы.

Спектральные измерения показали, что пиковое значение в спектре ПОУ превышало уровень суперлюминесцентного пьедестала на 30 дБ при выходной оптической мощности 50 мВт (рис.6). Форма спектрального пика (рис.7) в точности соответствовала форме и ширине аппаратной функции дифракционной решетки. Численное интегрирование выходного спектра ПОУ, представленного на рис.6, показало, что 98% мощности оптического сигнала содержится в спектральном пике и только 2% приходится на пьедестал.

На рис.8 представлена форма огибающей функции видности (автокорреляционная функция (АКФ)) интерференционной картины, записанная с помощью сканирующего интерферометра Майкельсона высокого разрешения. Полуширина центрального максимума отвечала

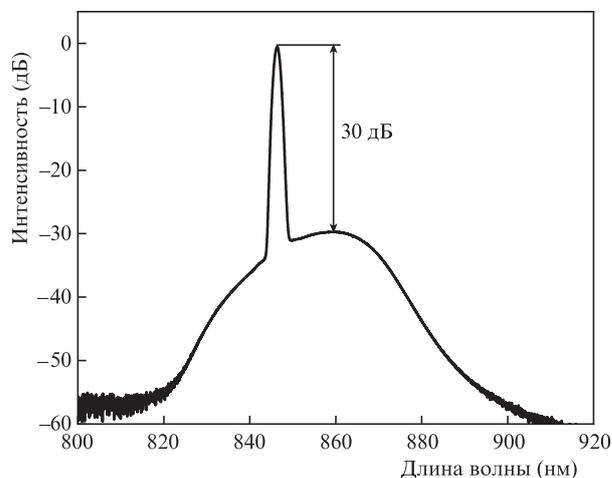


Рис.6. Спектр усиленного оптического сигнала при выходной мощности ПОУ 50 мВт.

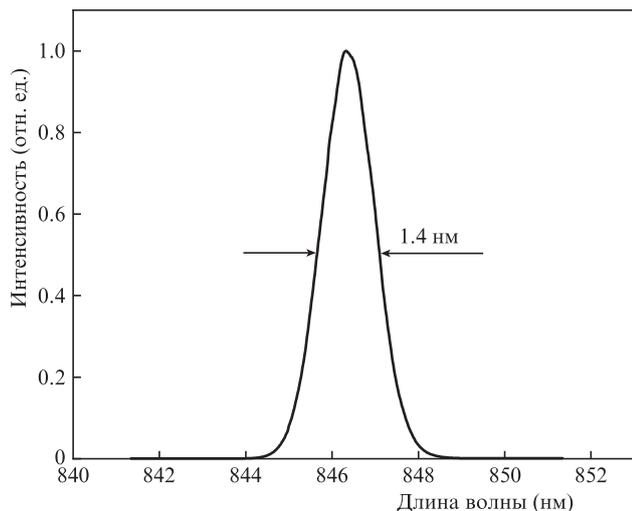


Рис.7. Форма спектрального пика усиленного оптического сигнала (линейный масштаб).

длине когерентности 0.45 мм. Измеренная длина когерентности достаточно точно соответствует расчетной для выходного спектра гауссовой формы [12]. Величина вторичных боковых максимумов, примыкающих к центральному, в низкокогерентных интерферометрических применениях определяет соотношение сигнал/шум и напрямую влияет на качество получаемых изображений. В исследуемой нами схеме источника излучения амплитуды вторичных пиков были незначительными и не превышали 7%–8% от максимальной. Их наличие в АКФ обусловлено отличием формы аппаратной функции дифракционной решетки от «идеальной» гауссовой формы.

Исследуемая оптическая схема источника была экспериментально проверена в режиме перестройки длины волны излучения при ручном контроле мощности (РКМ) на оптическом выходе ПОУ. Перестройка осуществлялась поворотом дифракционной решетки с шагом, соответствующим спектральной перестройке на 1 нм, а режим РКМ осуществлялся подстройкой тока инжекции ПОУ до значения, при котором выходная оптическая мощность соответствовала 20 мВт. Спектральный диапазон перестройки, в котором амплитуда спектрального пика

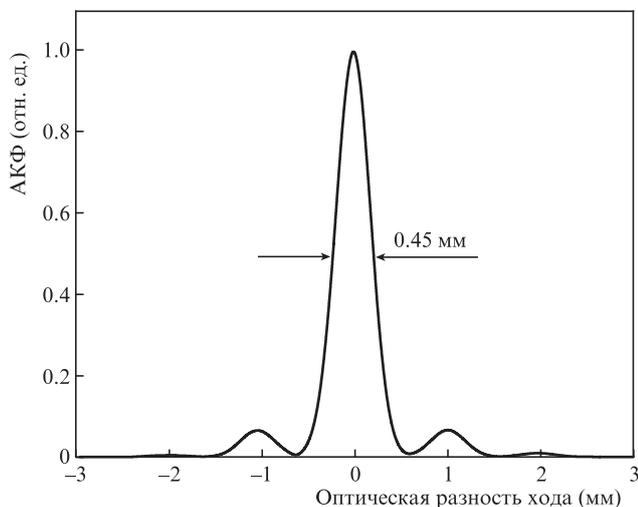


Рис.8. Огибающая функции видности интерференционной картины.

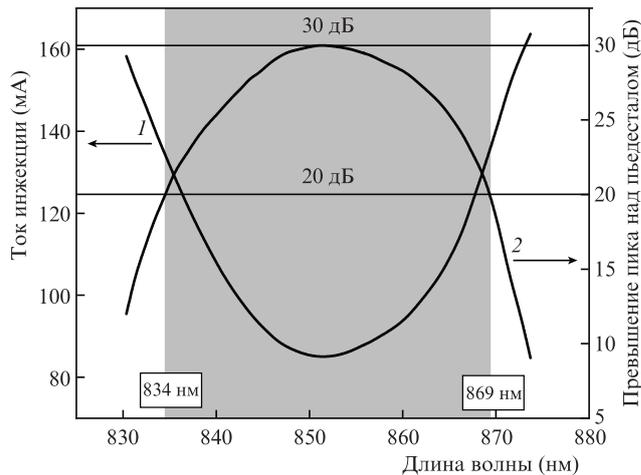


Рис.9. Зависимость тока инжекции ПОУ от длины волны входного оптического сигнала ( $I$ ) и кривая превышения амплитуды пика в спектре излучения ПОУ над суперлюминесцентным пьедесталом (2). Серым цветом показан диапазон спектральной перестройки при превышении амплитуды пика над пьедесталом более 20 дБ. Измерения выполнены в режиме РКМ при выходной оптической мощности 20 мВт.

превышала уровень суперлюминесцентного пьедестала минимум на 20 дБ, составил 35 нм (серая зона на рис.9). Ширина спектрального максимума сохранялась неизменной во всем диапазоне перестройки. При необходимости интервал перестройки может быть увеличен при использовании задающего СЛД с более широким спектром излучения. Однако это неизбежно приведет к снижению спектральной плотности мощности на выходе СЛД и, следовательно, к уменьшению превышения спектрального пика над пьедесталом в выходном спектре ПОУ. Выбор оптических модулей (СЛД и ПОУ), позволяющих достичь оптимальной комбинации между диапазоном спектральной перестройки и превышением амплитуды спектрального максимума над уровнем пьедестала, напрямую зависит от требований конкретного технического применения.

Важной рабочей характеристикой любого оптического источника света является степень поляризации выходного излучения. В исследуемой оптической схеме соотношение оптической мощности по осям выходного световода составило 20:1, что соответствовало степени поляризации выходного излучения 90%. Поскольку степень поляризации излучения на входе оптического усилителя была очень высокая (более 99%), снижение ее на выходе схемы можно объяснить недостаточной точностью пространственной угловой ориентации выходного ОВС относительно активного канала кристалла ПОУ. Очевидно, что этот параметр можно увеличить при использовании ПОУ-модуля с более точной угловой ориентацией выходного ОВС.

Важно отметить, что предложенный вариант оптической схемы допускает, в определенных пределах, оптимизацию ширины спектрального максимума путем подбора диаметра пучка, падающего на дифракционную решетку, и числа штрихов решетки, задействованных в дифракции. Так, например, при той же геометрии схемы простая замена примененного оптического коллиматора на коллиматор с диаметром выходного пучка 1.2 мм, позволит получить спектральный максимум шириной 2.8 нм. Выбор подходящего соотношения между диаметром пучка

ка и числом штрихов дифракционной решетки напрямую диктуется техническими требованиями конкретного практического применения.

#### 4. Заключение

Проведенное исследование показало практическую возможность создания низкокогерентного источника оптического излучения высокой спектральной яркости на базе серийно выпускаемых светоизлучающих модулей СЛД (SLD-381) и ПОУ (SOA-372), а также стандартной объемной дифракционной решетки нарезного типа с плотностью штрихов 300 штр./мм. Экспериментально продемонстрирована работоспособность оптической схемы источника со следующими выходными параметрами: спектральной плотностью мощности излучения 36 мВт/нм, диапазоном перестройки выходной длины волны 35 нм (834 – 869 нм), величиной превышения спектрального максимума над суперлюминесцентным пьедесталом более 20 дБ.

Показано, что центральный максимум в оптическом спектре шириной 1.4 нм обладает гладкой колоколообразной формой, близкой к гауссовой, с вторичными боковыми пиками, находящимися ниже уровня пьедестала (менее –30 дБ). Получено хорошее соответствие между измеренной по автокорреляционной функции длиной когерентности (на уровне полувисоты) и ее расчетной величиной для случая спектра гауссовой формы. Следует отметить универсальность предложенной оптической схемы, заключающуюся в том, что простой заменой оптических элементов (СЛД, ПОУ, оптических коллиматоров, дифракционной решетки) схема может быть перестроена для использования в других спектральных диапазонах. Изменение таких технических характеристик, как диаметр оптического пучка, падающего на дифракционную решетку, число штрихов решетки, а также угол падения

пучка света на решетку, позволяет в небольших пределах изменять ширину спектрального пика в выходном спектре. Это дает пользователю возможность оптимизации спектральных характеристик схемы для конкретного практического применения. Кроме того, поворот дифракционной решетки позволяет осуществлять в определенных пределах настройку центрального максимума в спектре излучения на заданную длину волны излучения.

1. Semenov A.T., Shidlovski V.R., Safin S.A. *Electron. Lett.*, **29** (10), 854 (1993).
2. Semenov A.T., Batovrin V.K., Garmash I.A., Shidlovsky V.R., Shramenko M.V., Yakubovich S.D. *Electron. Lett.*, **31** (4), 314 (1995).
3. Батоврин В.К., Гармаш И.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Любарский А.В., Плявенек А.Г., Сафин С.А., Семенов А.Т., Шидловский В.Р., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996) [*Quantum Electron.*, **26** (2), 109 (1996)].
4. Drexler W., Fujimoto J.G. *Optical Coherence Tomography* (Springer-Verlag, 2008).
5. Lefèvre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope* (Artech House, 2014).
6. Fang-Wen Sheu, Pei-Ling Luo. *Am. J. Phys.*, **76** (8), 769 (2008).
7. Аникеев А.С., Багаев Т.А., Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Панкратов К.М., Шидловский В.Р., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **49** (9), 810 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (9), 810 (2019)].
8. Connelly V.J. *Semiconductor Optical Amplifiers* (Kluwer Academic Publishers, 2002).
9. Kwong N.S. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **4** (9), 996 (1992).
10. Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Кукушкин И.А., Ладугин М.А., Лапин П.И., Лобинцов А.А., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **41** (8), 677 (2011) [*Quantum Electron.*, **41** (8), 677 (2011)].
11. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Лобинцов А.А., Мармалюк А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **43** (11), 994 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (11), 994 (2013)].
12. Akcaу C., Parrein P., Rolland J.P. *Appl. Opt.*, **41** (25), 5256 (2002).