

УДК 531.383:621.375.8  
EDN DMBMAR

Д. А. ЕГОРОВ, Е. Л. КЛЮЧНИКОВА, А. А. УНТИЛОВ, А. С. АЛЕЙНИК, С. А. ВОЛКОВСКИЙ,  
В. Н. КУЗНЕЦОВ, В. С. ОШЛАКОВ, Г. К. ПОГУДИН, Л. Б. ЛЮКОМОВИЧ

## ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

*Одним из ключевых компонентов волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) является источник оптического излучения. С оптическими параметрами источника излучения непосредственно связаны характеристики ВОГ, в том числе стабильность масштабного коэффициента и смещения нуля. В настоящей работе рассмотрены основные типы источников оптического излучения, которые наиболее целесообразно применять в ВОГ, описаны принципы их построения и релевантные технические характеристики, дан обзор коммерчески доступных источников, приведена краткая оценка перспектив их развития в контексте оптоволоконной гироскопии.*

**Ключевые слова:** источники оптического излучения, спектральные характеристики, волоконно-оптический гироскоп, стабильность масштабного коэффициента.

### 1. Введение, общие положения

На протяжении последних десятилетий одним из важных направлений исследований и разработок в области волоконной оптики применительно к задачам навигации, позиционирования, ориентации, стабилизации и управления движением является разработка волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), которые составляют серьезную конкуренцию традиционным механическим и лазерным гироскопам благодаря высокой надежности, широкому динамическому диапазону, большому сроку службы, низкому энергопотреблению, небольшому весу и низкой стоимости [1, 2].

Принцип действия ВОГ основан на эффекте Саньяка в кольцевом интерферометре, который хорошо известен [2]. Суть эффекта состоит в том, что оптические волны в волоконно-оптическом кольцевом интерферометре (ВКИ) (его также называют

---

**Егоров** Дмитрий Александрович. Ведущий инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

**Ключникова** Елизавета Леонидовна. Инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

**Унтилов** Александр Алексеевич. Кандидат технических наук, начальник лаборатории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

**Алейник** Артем Сергеевич. Кандидат технических наук, заведующий лабораторией НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО (С.-Петербург).

**Волковский** Сергей Александрович. Научный сотрудник НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО.

**Кузнецов** Владимир Николаевич. Инженер НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО.

**Ошлаков** Вадим Сергеевич. Инженер НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО.

**Погудин** Григорий Константинович. Инженер НИЦ световодной фотоники, Университет ИТМО.

**Люкомович** Леонид Борисович. Доктор физико-математических наук, профессор ВШПФиКТ, Политехнический университет Петра Великого (С.-Петербург).

интерферометром Саньяка), распространяющиеся во встречных направлениях, при его вращении с угловой скоростью  $\Omega$  приобретают разность фаз Саньяка  $\Delta\varphi$ , задаваемую соотношением [2]

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi R L}{\lambda c} \Omega, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны источника излучения, м;  $c$  – скорость света в вакууме, м/с;  $R$  – радиус контура кольцевого интерферометра, м;  $L$  – длина контура, м.

Эффект Саньяка является релятивистским, и для обеспечения приемлемого уровня чувствительности и измерения малых угловых скоростей  $\Omega$  ВКИ строят на основе многовитковой катушки, что позволяет кратно увеличить площадь волоконного контура при сохранении относительно небольших значений радиуса  $R$  и габаритов прибора в целом. ВКИ является самосогласованным, поскольку интерферирующие встречные волны в отсутствие нестационарных воздействий на контур проходят одинаковый путь и получают одинаковый набег фазы. Наличие нестационарных воздействий на контур, главным образом температурного, хотя и приводит к возникновению в разности фаз интерферометра составляющей, не связанной с угловой скоростью, не создает фундаментальных ограничений для этого метода измерения. Влияние таких воздействий может быть минимизировано за счет применения специальных методов намотки ВКИ и программных методов компенсации. Все это обусловило привлекательность создания ВОГ на основе ВКИ [2, 3].

Рабочую точку интерферометра ВОГ смещают из области максимума гармонической функции интерференции на более линейный участок, для этого используют специальную вспомогательную модуляцию аргумента интерференционных колебаний и специальную обработку сигнала интерферометра. Это позволяет определять разность фаз  $\Delta\varphi$  с высокой точностью и хорошим разрешением в большом диапазоне угловых скоростей [2].

Фундаментальные ограничения разрешающей способности измерения разности фаз  $\Delta\varphi$  и, как следствие, угловой скорости  $\Omega$  связаны с получаемым в интерференционном сигнале отношением «сигнал–шум», но на практике в ВКИ могут возникать дополнительные флуктуации и искажения интерференционного сигнала, ухудшающие результат измерения разности фаз Саньяка. Существенным фактором, создающим паразитные возмущения сигнала ВКИ, является возникновение различных дополнительных путей распространения волн в волоконном контуре и дополнительных интерференционных компонент, не связанных с угловой скоростью  $\Omega$ . Такие пути формируются из-за распространения света в оптическом волоконном контуре в виде различных поляризационных мод в условиях присутствия связи мод, из-за рассеяния света в волокне и взаимодействия встречных волн, паразитных отражений от волоконных соединений и от элементов схемы. Негативное влияние таких эффектов может быть частично нивелировано за счет конфигурации и точной настройки оптической схемы, однако остается значительным. Паразитные интерференционные компоненты вследствие упомянутых эффектов возникают и в волоконно-оптических интерферометрах другого типа, имеющих на порядки более короткие волоконные плечи и регистрирующих непосредственно наведенное воздействием изменение оптической длины волокна. По этой причине влияние слабых дополнительных интерференционных компонент для них обычно не так важно, как для ВОГ на основе ВКИ.

С другой стороны, благодаря специфике интерферометра Саньяка как самосоглазованного интерферометра основным общепринятым способом значительного подавления всех паразитных интерференционных компонент стало использование слабокогерентных источников оптического излучения (ИОИ) с относительно широким спектром. В этом случае проявляются интерференционные колебания только для волн, прошедших строго одинаковые оптические пути, что не дает возникнуть интерференции большинства паразитных оптических волн и подавляет искажения при измерении разности фаз Саньяка [4]. Применение подобных ИОИ позволяет снизить требования к возникающим отражениям в соединениях и элементах схемы, а также к экстинкции используемых поляризаторов и другим параметрам элементов, связанных с появлением в контуре интерферометра паразитных путей распространения света [2].

В настоящей статье предложен обзор и анализ основных типов ИОИ, пригодных для применения в ВОГ, кратко описываются принципы построения и технические характеристики таких источников, наиболее важные при использовании их в ВОГ. Кроме того, рассмотрены коммерчески доступные ИОИ, приведена краткая оценка перспектив развития ИОИ в контексте оптоволоконной гироскопии, даны рекомендации по выбору тех или иных ИОИ в зависимости от области применения разрабатываемых ВОГ.

## 2. Ключевые для построения ВОГ характеристики ИОИ

Если ранжировать все характеристики ИОИ по значимости в контексте применения в ВОГ, наиболее важными следует считать стабильность спектра и его ширину. Требования к стабильности спектра обусловлены непосредственным входением  $\lambda$  в соотношение (1). Широкий спектр и, как следствие, малая длина когерентности необходимы для подавления в интерференционном сигнале ВОГ компонент, не связанных с угловой скоростью  $\Omega$ . Второстепенным, но важным является уровень выходной мощности ИОИ, влияющий на отношение «сигнал–шум» интерференционного сигнала, а также поляризационные свойства источника – степень поляризации и ориентация поляризационных осей, которые необходимо учитывать при построении оптической схемы ВОГ для ослабления нежелательных взаимодействий поляризационных мод.

### *Средневзвешенная длина волны и ширина спектра излучения ИОИ*

При задействовании источника широкополосного оптического излучения необходимо уточнение параметра  $\lambda$  в формуле (1). В случае спектра оптического излучения источника  $S_p(\nu)$  (здесь  $S_p$  – спектральная плотность оптической мощности, Вт/Гц;  $\nu$  – частота оптического излучения, Гц), симметричного относительно центральной частоты  $\nu_0$ , в выражении (1) корректно использовать значение центральной длины волны  $\lambda_0 = c/\nu_0$ . Реальные источники могут иметь сложные несимметричные спектры, и в общем случае следует оперировать средневзвешенными величинами, которые определяются соотношением [5]

$$\lambda_{\text{св}} \approx \frac{c}{\nu_{\text{св}}} = c \cdot \left( \frac{\int \nu \cdot S_p(\nu) d\nu}{\int S_p(\nu) d\nu} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $\nu_{\text{св}}$  – средневзвешенная частота, которая задается выражением в скобках, а  $\lambda_{\text{св}}$  – средневзвешенная длина волны (СДВ). Для симметричного спектра  $\nu_{\text{св}} = \nu_0$  и  $\lambda_{\text{св}} = \lambda_0$ . СДВ непосредственно задает масштабный коэффициент (коэффициент преобразования) ВОГ в соответствии с (1), и ее смещение на  $\delta\lambda_{\text{св}}$  приводит к ошибочному смещению  $\delta\Omega$  измеренного значения угловой скорости:

$$\delta\Omega = \frac{\Omega}{\lambda_{\text{св}}} \cdot \delta\lambda_{\text{св}}. \quad (3)$$

Флуктуации  $\lambda_{\text{св}}$  могут возникать при изменениях формы спектра, в том числе обусловленных температурными эффектами и старением источника. Для ВОГ навигационного класса точности требуется стабильность СДВ на уровне 1 ppm (1 млн<sup>-1</sup>) с учетом влияния всех дестабилизирующих факторов, среди которых температура полупроводниковой структуры, ток накачки ИОИ и другие.

Ширину спектра ИОИ в общем случае также характеризуют с помощью ее среднеквадратичного значения [2, 5]:

$$\Delta\nu_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{\int (\nu - \nu_{\text{св}})^2 \cdot S_p^2(\nu) d\nu}{\int S_p^2 d\nu}}. \quad (4)$$

В случае простых и особенно симметричных зависимостей  $S_p(\nu)$  часто приводят ширину спектра, определяемую по заданному уровню снижения  $S_p$  относительно максимального значения. Связь таких оценок со среднеквадратичной шириной зависит от формы спектра. Если, например,  $S_p(\nu)$  описывается гауссовой кривой с дисперсией  $\sigma$  в виде  $S_p(\nu) \sim \exp[-(\nu - \nu_0)^2/4\sigma^2]$ , то из (2) и (4) получим  $\Delta\nu_{\text{ск}} = \sigma$ , а часто используемая полная ширина по уровню 1/2 максимума (т.е. по уровню -3дБ) будет равна  $\text{FWHM} = 3,33 \cdot \Delta\nu_{\text{ск}}$ .

Следует также отметить, что приборы для измерения спектра ИОИ в большинстве случаев измеряют зависимость  $S_p$  от длины волны, т.е. регистрируют спектр источника в шкале длин волн. В таком случае, чтобы воспользоваться выражениями (2) и (3), необходимо пересчитать зависимость  $S_p(\lambda)$  в спектр  $S_p(\nu)$ , при этом следует задействовать для аргумента связь  $\lambda = c/\nu$  и учесть связь  $\delta\nu = \delta\lambda \cdot c/(\lambda^2)$  для ширины полосы фильтра спектроанализатора при пересчете уровня  $S_p$ . Ширина спектра по уровню 1/2 максимума для ИОИ в ВОГ навигационного класса точности должна составлять 5 нм и более [11], большинство коммерчески доступных ИОИ подходящих типов имеют ширину спектра в диапазоне 30–80 нм.

### Временная когерентность излучения ИОИ

Важной характеристикой, учитывающей свойства некогерентности ИОИ и подавление влияния интерференции волн, прошедших разные оптические пути, является временная когерентность излучения оптического источника. Если это излучение разделяется на две волны, которые проходят через два пути с разностью  $\Delta L$  и затем совмещаются, то при изменении  $\Delta L$  будут наблюдаться интерференционные колебания мощности, описываемые выражением [2]

$$P(\Delta L) = \frac{P_0}{2} \left[ 1 + \gamma_{\text{ce}}(\Delta L) \cos\left(2\pi \frac{\Delta L \cdot n}{\lambda_{\text{св}}}\right) + \gamma_{\text{co}}(\Delta L) \sin\left(2\pi \frac{\Delta L \cdot n}{\lambda_{\text{св}}}\right) \right], \quad (5)$$

где  $P_0$  и  $\lambda_{св}$  – мощность и средневзвешенная длина волны ИОИ,  $n$  – показатель преломления среды, в которой разделяются и совмещаются интерферирующие волны.

Выражение (5) записано в предположении, что интерферирующие волны имеют одинаковые амплитуды и одинаковое состояние поляризации, что позволяет избежать введения дополнительных коэффициентов, учитывающих такие рассогласования. При рассмотрении интерференционных колебаний (5) применительно к случаю самосогласованного интерферометра Саньяка эквивалентная разность хода составляет  $\Delta L = 2R \cdot L \cdot \Omega / c$ . Снижение амплитуды интерференционных колебаний с ростом  $\Delta L$  задает функция когерентности [6], представленная в (5) четной  $\gamma_{сe}(\Delta L)$  и нечетной  $\gamma_{сo}(\Delta L)$  компонентами, которые связаны со спектром источника. При симметричном спектре нечетная компонента отсутствует, однако даже в случае асимметричного спектра вклад нечетной составляющей, как правило, мал, и им пренебрегают при количественной оценке функции когерентности.

Чем быстрее снижается функция когерентности ИОИ с ростом  $\Delta L$  и чем меньше уровень осцилляций этой зависимости (наличие и величина так называемых «боковых лепестков» функции – вторичных, или побочных, максимумов), тем меньше формируется паразитных интерферометрических компонент в реальной схеме кольцевого интерферометра ВОГ [7]. Общий спад функции когерентности происходит тем быстрее, чем больше  $\Delta\nu_{ск}$  источника, а особенности осцилляций зависимостей  $\gamma_{сe}(\Delta L)$  и  $\gamma_{сo}(\Delta L)$  связаны со спецификой формы спектра излучения источника (функции когерентности ряда коммерчески доступных ИОИ приведены в разделе 5).

Для ИОИ, применяемых в ВОГ, наиболее информативны длина когерентности  $L_c$  и длина декогерентности  $L_{dc}$ , определяемые по уровням функции когерентности 0,8 и 0,03 соответственно (рис. 1). Величина  $L_{dc}$  у ИОИ не должна превышать единиц миллиметров и у большинства подходящих источников лежит в диапазоне от 30-50 мкм (для суперлюминесцентных диодов) до 300-500 мкм (для эрбиевых суперлюминесцентных источников).

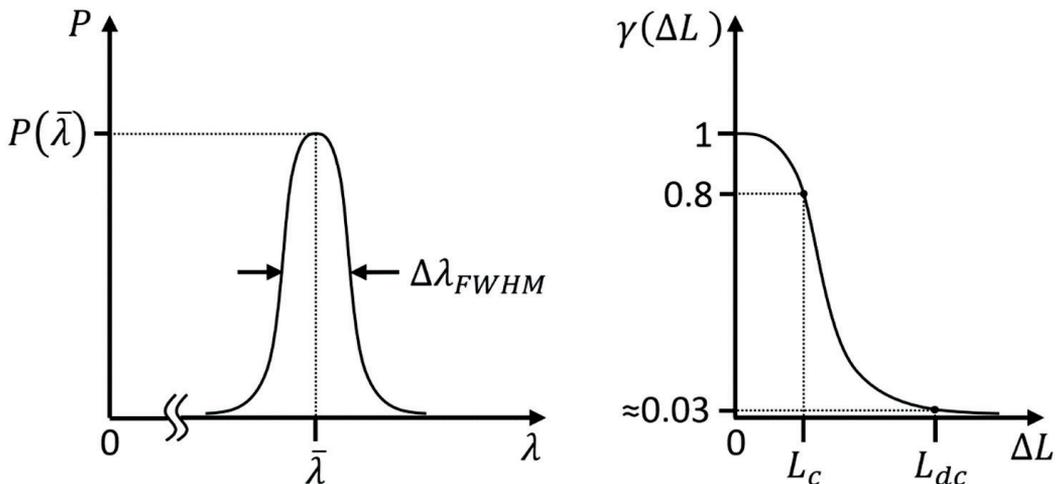


Рис. 1. Спектр ИОИ и его функция когерентности,  $\Delta\lambda_{FWHM}$  – ширина спектра на полувысоте [6]

На практике реальные источники излучения обычно характеризуются спектром мощности  $S_p(\lambda)$ . Это свойство проще определить, поскольку производятся и доступны соответствующие приборы для измерения спектра оптического излучения, и именно спектры мощности обычно приводят производители в данных на ИОИ. При необходимости компоненты функции когерентности  $\gamma_{cc}(\Delta L)$  и  $\gamma_{co}(\Delta L)$  можно получить из анализа формы спектра ИОИ с помощью обратного преобразования Фурье [2, 7]. Такая оценка может быть полезна, например, при сравнительном анализе различных ИОИ, направленной модификации спектра ИОИ и в других практических сценариях.

Влияние формы спектра на погрешности измерения  $\Omega$  нельзя описать простыми очевидными выражениями, тем более что это влияние может зависеть от алгоритма обработки интерференционного сигнала и других факторов. Понятно, что оптический источник с более широким симметричным гауссоподобным спектром предпочтителен с точки зрения точностных характеристик ВОГ. Малые длины когерентности и некогерентности, а также отсутствие «боковых лепестков» свидетельствуют о том, что энергия паразитных интерференционных составляющих такого ИОИ незначительны. Понятно также, что при сравнении двух ИОИ с похожими спектрами предпочтение следует отдать источнику с наименьшими  $L_c, L_{dc}$  и высотой «лепестков», однако для строгого сравнения двух источников, первый из которых, например, имеет более широкий, но менее симметричный спектр, чем второй, необходим численный анализ формирования и обработки сигнала в схеме с кольцевым интерферометром с учетом спектра источника. Проведение таких исследований для наиболее часто используемых в ВОГ ИОИ (с различной формой спектров) представляет собой тему отдельной работы.

### *Выходная оптическая мощность ИОИ*

В контексте применения в ВОГ важной характеристикой ИОИ является также абсолютный уровень выходной оптической мощности  $P_0$ , который определяет уровень интерференционного сигнала и результирующее отношение «сигнал–шум», ограничивающее разрешение измерения фазы Саньяка и угловой скорости. С ростом  $P_0$  снижается роль шумов электронной схемы детектирования и вклад дробового шума [8]. Кроме того, при достаточно высокой выходной мощности ИОИ может быть использован для обеспечения работы нескольких ВОГ в составе навигационных модулей, содержащих, как правило, три или четыре гироскопа с разной ориентацией осей чувствительности волоконно-оптических катушек.

Диапазон значений оптической мощности ИОИ для ВОГ достаточно широк, приборы с относительно коротким контуром (до 1 км) могут быть построены на источниках с мощностью около 1 мВт, однако для достижения высокого отношения «сигнал–шум» в высокоточных приборах (длина контура 1 км и более) требуются ИОИ с выходной оптической мощностью 10 мВт и более.

Следует также отметить, что с ростом оптической мощности ИОИ и соответствующим повышением плотности энергии в волокне в выходном сигнале ВОГ увеличивается погрешность, обусловленная нелинейным эффектом Керра. Существенно ослабить вклад этой погрешности позволяет применение в ВОГ ИОИ с широким спектром [2].

### *Относительный шум интенсивности*

Тесно связанным с уровнем мощности ИОИ параметром является уровень относительного шума интенсивности (Relative Intensity Noise – RIN, обычно приводимый в децибелах относительно интенсивности оптического излучения на выходе ИОИ). Этот параметр характеризует уровень случайных колебаний выходной оптической мощности ИОИ, обусловленных рядом факторов, в частности тепловыми колебаниями активной среды и некоторыми другими.

Разновидностью RIN для ИОИ с широким спектром является избыточный относительный шум интенсивности (Excess RIN – ERIN), возникающий в результате случайных колебаний оптической мощности различных спектральных компонент. ERIN является одним из главных параметров ИОИ, ограничивающих отношение «сигнал–шум» оптоэлектронной схемы ВОГ и, как следствие, увеличивающих так называемый случайный уход по углу ARW (Angular Random Walk), причем спектральная плотность мощности ERIN обратно пропорциональна ширине спектра, поэтому подобный эффект сильнее проявляется у ИОИ с более узким спектром. Следует отметить, что известно достаточно много способов ослабления влияния ERIN на характеристики ВОГ на уровне как оптической схемы, так и электроники и алгоритмов обработки сигнала [9, 10]. В большинстве высокоточных ВОГ с широкополосным ИОИ применение одного или нескольких способов позволяет уменьшить вклад ERIN в фазовую ошибку интерферометра до уровня дробового шума.

### *Поляризационные свойства ИОИ*

При построении высокоточных ВОГ необходимо учитывать поляризационные свойства всех компонентов оптической схемы и соединений между ними. Преобразования поляризации являются одной из причин нарушения самосогласованности интерферометра Саньяка и возникновения в выходном сигнале ВОГ компонент, связанных не с угловой скоростью, а с интерференцией различных поляризационных мод. Для подавления этих компонент наиболее часто используют один из двух подходов: построение контура интерферометра из волокна с сохранением поляризации и из стандартного оптоволоконного совместно с деполяризацией входящего и выходящего излучения [2].

В обоих случаях предпочтительно применение неполяризованного или деполяризованного ИОИ с дальнейшим привлечением поляризаторов в оптической схеме, поскольку в таком случае нет необходимости согласовывать поляризационные моды волоконного вывода источника и волоконного контура интерферометра. При этом поляризовать излучение с высокой экстинкцией проще, чем генерировать и поддерживать высокую стабильность состояния поляризации на выходе ИОИ. Задействование в оптической схеме поляризатора и волокна с сохранением поляризации позволяет несколько смягчить требования к низкой степени поляризации ИОИ, но для высокоточных приборов эта величина не должна превышать 1%.

В табл. 1 приведены краткий перечень и описание наиболее существенных для ВОГ характеристик ИОИ.

## Ключевые характеристики ИОИ, применяемых в ВОГ

Характеристика	Общие требования / механизм влияния
Выходная оптическая мощность (в волокне)	<p>Выше мощность – выше сигнал/шум ВОГ.</p> <p>Слишком высокая мощность – опасность возникновения нелинейных эффектов в волокне.</p> <p>Высокая мощность позволяет одним источником обслуживать несколько интерферометров.</p> <p>Минимальный уровень мощности определяется параметрами ВОГ: длиной контура, параметрами схемы обработки и др.</p> <p>Условный минимум <math>\approx 10</math> мВт.</p>
Ширина спектра по полувысоте	<p>Шире спектр – меньше длина когерентности и ниже вклад паразитных интерференционных компонент в сигнал ВОГ.</p> <p>Для ВОГ навигационного класса точности условная минимальная граница <math>\approx 5</math> нм [11].</p>
Форма спектра	Чем ближе спектр к гауссовой форме, тем меньше энергия паразитных интерференционных компонент.
Стабильность СДВ	<p>СДВ входит в масштабный коэффициент ВОГ.</p> <p>Для ВОГ навигационного класса точности желательна долговременная стабильность СДВ порядка 1 ppm [12].</p>
Форма функции когерентности, длина когерентности ( $L_c$ )	<p>Для ВОГ предпочтительны ИОИ с минимальной длиной <math>L_c</math> и отсутствием «боковых лепестков».</p> <p>В случае схожих по форме функций когерентности предпочтителен ИОИ с наименьшей длиной когерентности и минимальной высотой «боковых лепестков».</p> <p>В случае функций сильно различной формы для корректного сравнения следует проводить численное моделирование или сравнительный эксперимент.</p>
Избыточный относительный шум интенсивности (ERIN)	<p>Рост ERIN ведет к росту ARW ВОГ.</p> <p>Шире спектр – ниже ERIN.</p> <p>Существуют эффективные способы снижения ERIN.</p>
Поляризация выходного излучения	<p>Для высокоточных ВОГ предпочтительны ИОИ с неполяризованным или деполяризованным излучением.</p> <p>Использование поляризатора в схеме ВОГ снижает вводимую оптическую мощность, но существенно ослабляет негативные эффекты, связанные с поляризацией ИОИ.</p>

## 3. Основные типы ИОИ, пригодных для применения в ВОГ

В ВОГ тактического класса точности с длиной контура кольцевого интерферометра менее 1 км часто используют ИОИ с СДВ около 850 нм, т.е. в так называемом первом окне прозрачности кварцевых оптических волокон. В случае протяженного оптоволоконного контура для навигационных ВОГ (1 км и более) актуальны источники с СДВ порядка 1550 нм, это так называемый С-диапазон или третья «окно прозрачности», где минимальны потери оптической мощности в кварцевых оптических волокнах. Сни-

жение чувствительности интерферометра, обусловленное увеличением СДВ, может быть скомпенсировано многократным удлинением оптоволоконного контура [2].

Светоизлучающие диоды (светодиоды), несмотря на их широкий спектр, не стали эффективными источниками для ВОГ, поскольку они не могут обеспечить ни достаточный уровень оптической мощности в оптическом волокне, ни работу в С-диапазоне.

Лазерные источники также не получили широкого применения в ВОГ, поскольку имеют дискретный и слишком узкий спектр, хотя в ряде исследований последних лет показано, что потенциально их можно задействовать как в ВОГ тактического класса точности, так и в более точных приборах, в таких случаях их спектр расширяют различными способами.

Наиболее привлекательны и перспективны на сегодня две разновидности ИОИ, которые основаны на эффекте усиления спонтанной эмиссии или суперлюминесценции (Amplified Spontaneous Emission – ASE) с СДВ около 1550 нм и имеют относительно широкий спектр. Это суперлюминесцентные диоды (СЛД) [13–15] и суперфлуоресцентные (в России также часто называемые суперлюминесцентными) волоконные источники оптического излучения (Superfluorescent Fiber Source – SFS), чаще всего реализуемые на активном эрбиевом волокне (далее – эрбиевые суперлюминесцентные источники, ЭСИ) [8, 16–18].

В последующих разделах более подробно рассматриваются перечисленные выше источники.

#### 4. Суперлюминесцентные диоды

СЛД представляют собой двойную гетероструктуру из активного слоя, помещенного между слоями полупроводников  $p$ -типа и  $n$ -типа, сформированную на подложке  $n$ -типа. Их устройство похоже на устройство лазерных диодов за одним исключением: у СЛД отсутствуют зеркала резонаторов (рис. 2), вместо этого со стороны выхода излучения часто наносят просветляющее покрытие, а противоположную сторону скалывают под углом и/или наносят слой поглощающего материала. Спонтанное излучение, возникающее в результате приложения к электродам разности потенциалов, в идеальном случае проходит через активную область только единожды, поэтому усиливаются не конкретные моды, что характерно для системы с резонатором, а все длины волн, соответствующие параметрам гетероструктуры [19].

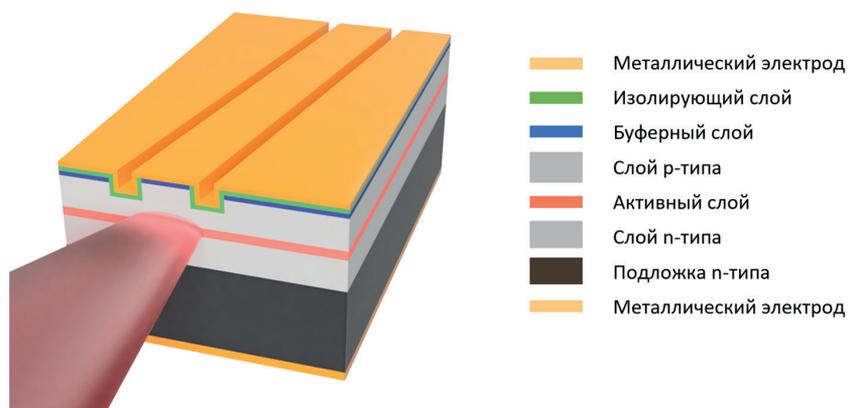


Рис. 2. Упрощенная структура ИОИ типа СЛД с гребенчатым волноводом и скошенными торцевыми поверхностями для подавления резонанса

Серийно выпускаемые СЛД имеют длину активной области порядка 300-500 мкм. Полупроводниковая структура помещается в корпус с последующей герметизацией, с выходной стороны активной зоны к СЛД подводят оптоволокно. Уровень вводимой в волокно оптической мощности, как правило, составляет единицы-десятки милливатт, эффективность введения излучения в волокно – 10-20%. По этому параметру СЛД сопоставимы с лазерными диодами – они также имеют высокую степень пространственной когерентности, однако отличаются от лазерных диодов существенно более широким спектром излучения.

Поскольку принцип работы СЛД основан на генерации и усилении спонтанной эмиссии, форма и используемые в составе кристалла вещества напрямую влияют на параметры результирующего излучения. Например, для разных поляризационных мод коэффициенты усиления могут быть различны в определенных типах материала активного слоя. Наиболее часто используемые в конструкции ВОГ ИОИ имеют длину волны 1550 нм, в СЛД этого спектрального диапазона в качестве материала активной среды обычно применяют гетероструктуру InGaAlAs, для которой характерна выраженная зависимость усиления спонтанной эмиссии от ее поляризации. Результирующее излучение СЛД, таким образом, имеет эллиптическую поляризацию – около 70-80% мощности излучения поляризовано параллельно плоскости активной области.

Большинство коммерчески доступных СЛД с гауссовой формой спектра характеризуются шириной спектра по полувысоте 30-80 нм (спектры коммерчески доступных СЛД рассматриваются далее). В мощных СЛД могут быть выражены пульсации спектральной плотности мощности – как правило, в окрестности пиковой длины волны. Такие пульсации объясняются наличием остаточного отражения от торцов чипа и подведенного волокна. Основная мера борьбы с этим явлением – также проветривание поверхности волокна и диода.

Главная сложность в случае применения СЛД в ВОГ заключается в относительно низкой стабильности спектра и уходе СДВ как под влиянием температурных изменений (порядка 400 ppm/°C), так и при колебаниях управляющего тока (порядка 40 ppm/мА) [2]. Активная термостабилизация полупроводниковой структуры, питание высокостабильным током и прочие технические меры позволяют стабилизировать величину СДВ приблизительно до 150 ppm в диапазоне температур от –40°C до +60°C [20].

Ограничивающим фактором выступает также изменение характеристик СЛД в результате старения, особенно при повышенной температуре в области полупроводниковой структуры. Данный эффект выражается главным образом в изменении выходной оптической мощности – чаще в снижении, реже в нарастании. Физические механизмы деградации на текущий момент активно исследуются: в различных обзорах [20–22] определено более 10 механизмов. Негативный вклад подобных эффектов может быть частично нивелирован за счет дополнительных компенсационных механизмов – термостабилизации, прецизионных источников тока, обратной связи по оптической мощности и др. [13, 17, 23, 24], однако достижение стабильности СДВ на уровне лучше 100 ppm – по-прежнему технически сложная задача.

В контексте применения в ВОГ источники типа СЛД подходят для приборов, к которым предъявляются повышенные требования с точки зрения снижения массогабаритных характеристик и конечной стоимости. СЛД может быть использован непосредственно в составе интегрально-оптического модуля совместно с другими оптическими компонентами схемы ВОГ, что позволяет достичь минимальных габаритов.

ритов конечного устройства [25, 26]. С другой стороны, относительно низкая стабильность СДВ и дрейф характеристик, обусловленный старением, ограничивают применение СЛД в ВОГ, предназначенных для установки в высокоточные навигационные приборы и комплексы.

Среди производителей, включающих в состав своих приборов СЛД, российские НПК «Оптолинк», АО «Физоптика», а также американская компания KVH [27–29].

## 5. Суперлюминесцентные волоконные ИОИ

Другая разновидность ИОИ, часто применяемых при создании ВОГ, – суперфлуоресцентные (суперлюминесцентные) волоконные источники, где используются явления вынужденной и спонтанной эмиссии, а в качестве активной среды служит оптоволокно, легированное редкоземельными элементами – неодимом или эрбием. В ВОГ наиболее часто задействуют ИОИ на основе эрбиевого волокна – ЭСИ, поскольку спектр эмиссии таких ИОИ попадает в С-диапазон.

Минимальная схема ЭСИ содержит лазерный диод накачки и легированное эрбием активное волокно. Генерация излучения в активном волокне обусловлена схемой энергетических уровней ионов эрбия, представленной в упрощенном виде на рис. 3, а. За счет взаимодействия ионов эрбия с внутрикристаллическим полем кварцевого стекла (эффект Штарка) каждый из энергетических уровней эрбия расщепляется на подуровни (мультиплеты). Под действием фотонов излучения накачки ионы эрбия переходят из основного состояния  ${}^4I_{15/2}$  на метастабильный уровень  ${}^4I_{13/2}$  или в верхнее возбужденное состояние  ${}^4I_{11/2}$ , позже – на метастабильный уровень в результате процессов релаксации.

Ионы, находящиеся на метастабильном уровне, переходят в основное состояние как самопроизвольно, так и под воздействием излучения накачки, что сопровождается генерацией суперлюминесценции в области длин волн 1520–1570 нм в двух противоположных направлениях. Доля участвующих в генерации суперлюминесценции ионов увеличивается при повышении мощности излучения накачки, а также в значительной мере за счет воздействия уже сгенерированных фотонов с находящимися на метастабильном уровне ионами. Оптическая накачка осуществляется на длинах волн 980 нм и 1480 нм. Накачка на длине волны 1480 нм обладает более высокой квантовой эффективностью, но вместе с тем и более высоким по сравнению с накачкой на 980 нм коэффициентом шума [7].

Существуют однопроходные и двухпроходные схемы накачки активного волокна. В однопроходных часть суперлюминесценции, генерируемой в активном волокне под воздействием излучения накачки, не задействуется, в то время как в двухпроходных схемах (рис. 3, б) для ее применения в одно из плеч ЭСИ устанавливается отражатель. КПД двухпроходных схем с двусторонней накачкой и с ненакачиваемым эрбиевым волокном в своем составе (для уширения спектра ВОИ) зависит от длины этого волокна и составляет порядка 45–50%.

Большое количество работ посвящено сравнению характеристик ЭСИ разных конфигураций [11, 18, 30, 31]. По результатам анализа этих работ можно сделать вывод о том, что схемы с противонаправленной накачкой обладают наименьшими шумами интенсивности и более высокой стабильностью параметров, а для применения в ВОГ с точки зрения шумов в выходном сигнале наиболее эффективна двухпроходная схема с противонаправленной накачкой.

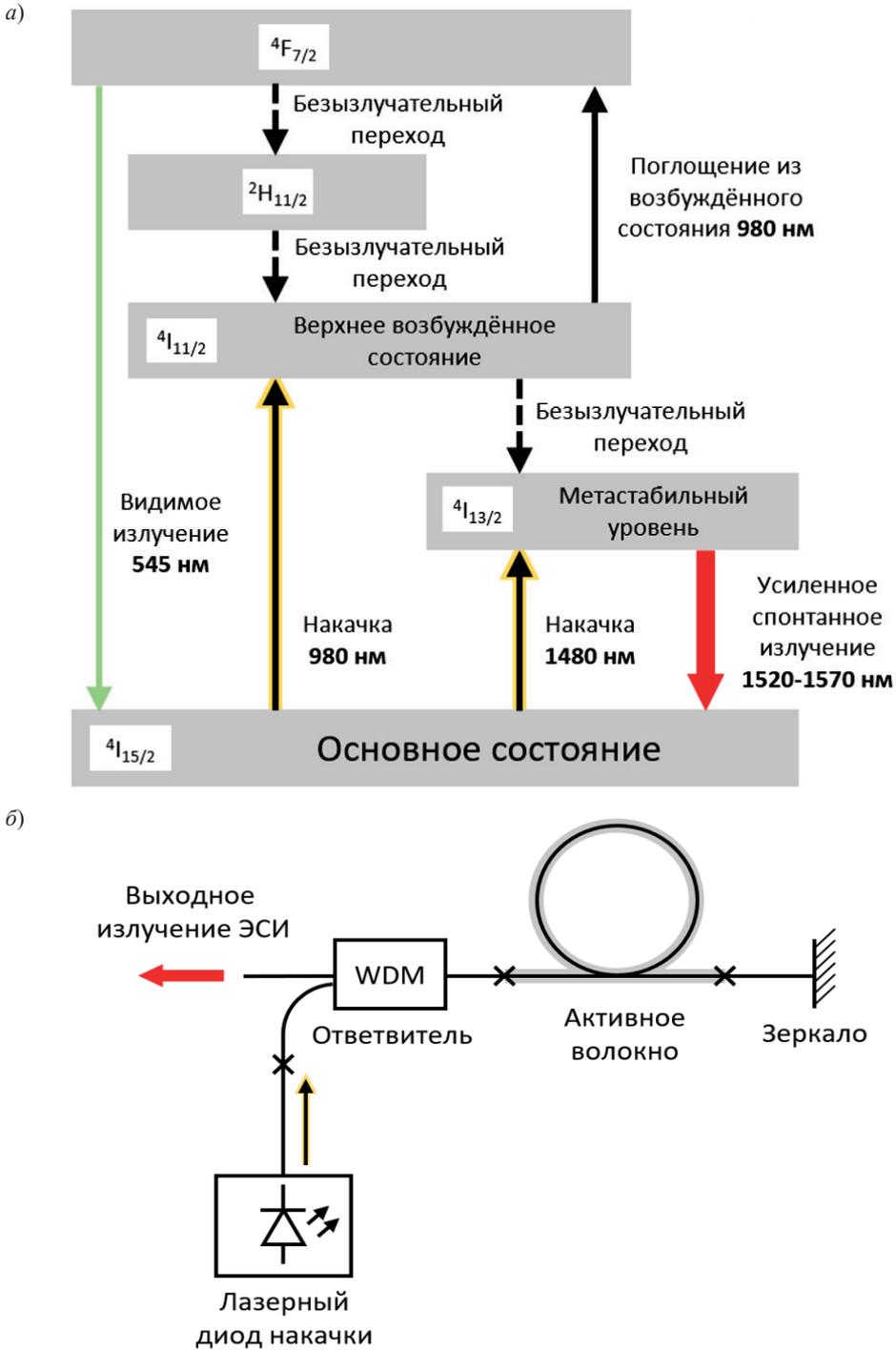


Рис. 3. Энергетические уровни  $Er^{3+}$  (a), двухпроходная схема противонаправленной накачки эрбиевого волокна (б)

Мощность большинства коммерчески доступных С-диапазонных ЭСИ варьируется в пределах 10-80 мВт, ширина спектра по полувысоте при этом может достигать 80-100 нм (в среднем 30-50 нм), а форма спектра, как правило, существенно отлича-

ется от гауссовой (спектры коммерчески доступных ЭСИ рассмотрены ниже). Как и в случае с СЛД, в оптических схемах ЭСИ существует вероятность возникновения узкополосной лазерной генерации из-за обратных отражений от торцов волокон, а также от подключенных к внешнему порту оптических устройств, этот эффект подавляют терминированием концов волокон и установкой волоконно-оптического изолятора на выход схемы.

Выходное излучение ЭСИ изначально не поляризовано в силу изотропного характера процесса спонтанной эмиссии. Поскольку в схеме ВОГ используют только одну поляризационную моду, на выходе такого ЭСИ ставят поляризатор, что приводит к двукратному падению выходной оптической мощности ИОИ.

Существуют также схемы построения ЭСИ, позволяющие получить поляризованное излучение, для этого в схему устанавливают поляризаторы и применяют компоненты, сохраняющие поляризацию излучения [32]. Наоборот, для снижения остаточной поляризации в ЭСИ осуществляется деполяризация излучения лазерных диодов накачки, а на выходе оптической схемы ЭСИ размещается деполяризатор Лео, а в двухпроходных схемах – зеркало Фарадея.

Поскольку энергетические уровни редкоземельных элементов намного стабильнее полупроводниковых, ЭСИ имеют более стабильную СДВ, что является одним из основных преимуществ ИОИ подобного типа при использовании в ВОГ. Для коммерчески доступных ЭСИ температурный коэффициент СДВ варьируется от 2 до 200 ppm/°C в зависимости от рабочего диапазона температур и спектрального диапазона выходного излучения. Так, ЭСИ с СДВ порядка 1530 нм имеют более стабильный по температуре спектр излучения по сравнению с ЭСИ с СДВ около 1560 нм [33, 34].

Таким образом, для повышения температурной стабильности СДВ целесообразно включение в оптическую схему ЭСИ фильтров, уменьшающих вклад спектральных компонент, энергия которых имеет выраженную температурную зависимость [35]. Кроме того, фильтры (например, на основе длиннопериодных волоконных решеток [36]) подавляют часть выходного спектра, делая его форму приближенной к гауссовой.

В настоящее время ЭСИ находят применение в ВОГ навигационного класса точности таких производителей, как АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ПАО «ПНППК», Exail (ранее iXblue), Northrop Grumman и ряда других [37–40].

В табл. 2 СЛД и ЭСИ сравниваются по ключевым характеристикам в контексте применения в ВОГ. Приведенные сведения относятся к большинству доступных на рынке ИОИ. Следует отметить, что в публикациях встречаются и существенно отличающиеся по характеристикам экземпляры устройств – они часто являются экспериментальными и/или представляют собой модифицированные ИОИ одного из двух представленных типов.

Т а б л и ц а 2

**Сравнение СЛД и ЭСИ по ключевым характеристикам в контексте применения в ВОГ**

Характеристика	ИОИ типа СЛД	ИОИ типа ЭСИ
Выходная оптическая мощность (в волокне)	Единицы – десятки мВт	Десятки – единицы сотен мВт
	Примечание: оба типа ИОИ имеют достаточную для применения в высокоточных ВОГ выходную мощность, ЭСИ в среднем мощнее.	

Характеристика	ИОИ типа СЛД	ИОИ типа ЭСИ
Ширина спектра по полувысоте	30-80 нм	30-50 нм
	Примечание: оба типа ИОИ имеют достаточно широкий спектр.	
Форма спектра	Близкая к гауссовой	Сложная
	Примечание: форму спектра ЭСИ можно приблизить к гауссовой, но это требует усложнения оптической схемы и влияет на другие характеристики ИОИ, например снижает выходную оптическую мощность.	
Стабильность СДВ в рабочем диапазоне температур	Порядка 100 ppm и более	Порядка 1...10 ppm
	Примечание: более стабильное значение СДВ – главное преимущество ЭСИ и одна из основных причин их более широкого применения в высокоточных ВОГ.	
Форма функции когерентности, длина когерентности ( $L_c$ )	Монотонно спадающая, без явных «боковых лепестков», $L_c$ порядка десятков микрон	Как правило, с выраженными «боковыми лепестками», $L_c$ порядка десятков микрон
	Примечание: в среднем $L_c$ СЛД в 2-3 раза меньше, чем у ЭСИ, длина декогерентности (по уровню 0,03) СЛД на порядок меньше, чем у ЭСИ из-за отсутствия «боковых лепестков».	
Избыточный относительный шум интенсивности (ERIN)	Примечание: величины ERIN сопоставимы, у СЛД чуть ниже из-за в среднем более широкого спектра.	
Поляризация выходного излучения	Частично поляризовано	Не поляризовано
Срок службы без существенной деградации спектральных характеристик	10...40 тысяч часов [21]	Порядка 100 тысяч часов [21]
Конструктивные особенности	<ul style="list-style-type: none"> <li>• малые габариты;</li> <li>• относительно невысокая эффективность ввода излучения в волокно;</li> <li>• возможность встраивания ИОИ в компактные электронно-оптические сборки;</li> <li>• коммерчески доступные устройства чаще всего в корпусе типа butterfly, DIP или аналогичных</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• габариты определяются радиусами изгиба волокон, поэтому ЭСИ, как правило, крупнее СЛД;</li> <li>• имеет волоконный выход и, соответственно, высокую эффективность ввода излучения в волокно</li> </ul>

## 6. Перспективные и экспериментальные ИОИ лазерного типа в ВОГ

Несмотря на то что на основе ИОИ лазерного типа сложно построить высокоточный ВОГ из-за большой длины когерентности и сопутствующей паразитной интерференции, другие характеристики лазерных ИОИ, например стабильность центральной длины волны и низкий избыточный шум, обуславливают целесообразность их адаптации для ВОГ.

Имеются сведения об успешном применении коммерчески доступного лазера с распределенной обратной связью в ВОГ тактического класса точности [41]. Про-

веденный авторами анализ механизма возникновения ошибки интерферометра позволил предположить, а в дальнейшем и проверить экспериментально, что использование более совершенных современных лазеров, волокон и других компонентов оптической схемы может ослабить вклад паразитных эффектов, свойственных лазерным ИОИ, до уровня, сопоставимого с ЭСИ по крайней мере в ВОГ тактического класса точности [42].

Известен способ ослабить вклад ложных интерференционных составляющих за счет использования лазерного источника в импульсном режиме [43]. Излучение в форме коротких импульсов позволяет в значительной мере исключить вклад в интерференционный сигнал составляющих, возникающих вследствие обратного рассеяния. Из-за незначительной пространственной протяженности коротких импульсов света вклад в паразитную интерференцию вносит только обратное рассеяние от короткого участка контура вблизи его середины [2, 44]. Излучение, рассеиваемое остальной частью контура, достигает фотоприемника ВОГ во временных интервалах между импульсами лазерного источника, а потому не интерферирует с его сигналом.

В контексте применения в ВОГ логичным техническим решением является искусственное расширение спектра лазерного источника. Один из способов заключается в удержании тока накачки лазерного диода чуть выше порогового уровня. Ширина спектра лазерного ИОИ в этом случае может составлять величины порядка сотен МГц, что достаточно для снижения шумовой и паразитной составляющих выходного сигнала ВОГ втрое относительно уровня, достижимого при более высоком токе накачки и ширине спектра порядка десятков МГц [45].

Другой способ состоит в использовании токовой модуляции ИОИ, в этом случае удается достичь расширения спектра до 1 ГГц, однако из-за взаимосвязи выходной мощности и формы спектра ИОИ положительный эффект от этого нивелируется ростом шумов интенсивности и нестабильностью положения центральной длины волны [45].

В работе [43] привлечение эрбиевого лазера с пассивной синхронизацией мод в импульсном режиме в сочетании с прохождением излучения через протяженный участок буферного волокна позволило получить широкий спектр, характерный для лазеров данного типа при генерации импульсов длительностью порядка сотен фемтосекунд. При этом за счет потерь в буферном волокне удается ослабить нелинейные эффекты непосредственно в контуре ВОГ, а благодаря дисперсионному уширению оптических импульсов можно рассматривать такой источник практически как излучающий в непрерывном режиме.

Один из наиболее перспективных способов расширения спектра относится к сфере радиофоники. Полезный эффект достигается приложением к излучению лазерного источника высокочастотной фазовой модуляции, формируемой генератором псевдослучайных последовательностей [45–47]. Для этого в схему ВОГ добавляют электрооптический фазовый модулятор и генератор высокочастотного электрического сигнала (рис. 4, а). Фазовая модуляция приводит к возникновению в спектре излучения симметричных относительно оптической несущей боковых полос, высота которых определяется амплитудой фазовой модуляции, а спектральный сдвиг относительно несущей – частотой модуляции. Увеличение амплитуды фазовой модуляции приводит к возникновению боковых полос более высоких порядков, наложение которых друг на друга приводит к разглаживанию и уширению общего спектра излучения

(рис. 4, б). Результирующая ширина спектра может достигать 40 ГГц, при этом сохраняется свойственная лазерному источнику стабильность центральной длины волны (до 0,15 ppm) и низкий уровень относительного шума интенсивности.

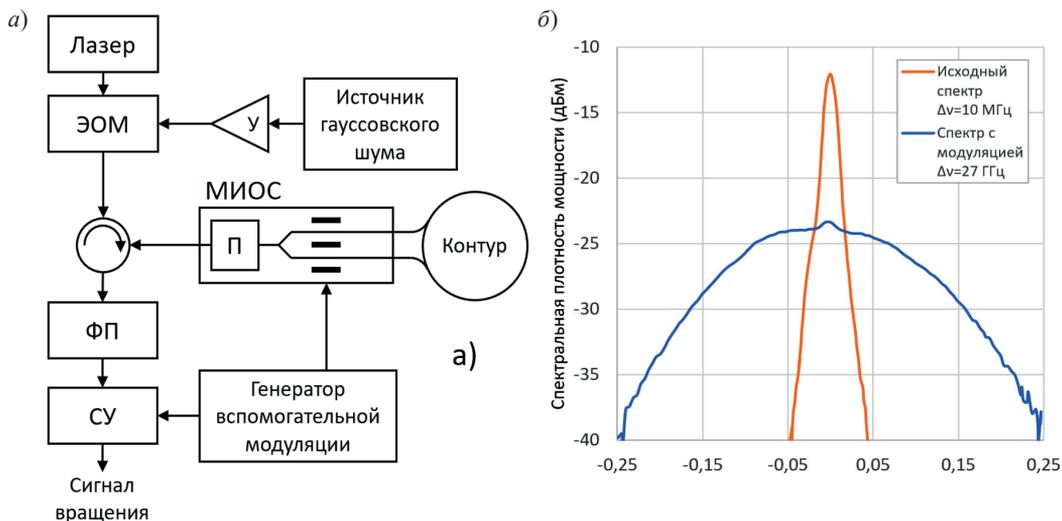


Рис. 4. Схема ВОГ с лазерным ИОИ и шумоподобной фазовой модуляцией (а):  
 У – усилитель, ЭОМ – электрооптический модулятор, СУ – синхронный усилитель,  
 МИОС – многофункциональная интегрально-оптическая схема, П – поляризатор, ФП – фотоприемник.  
 Результат уширения спектра лазерного ИОИ (б):  
 $\Delta\nu$  – ширина спектральной полосы по полувысоте [45]

Основной недостаток данного подхода заключается в неизбежном усложнении оптической и электрической схем устройства, что снижает надежность и повышает конечную стоимость ВОГ. Другая сложность состоит в необходимости подбора режима и параметров фазовой модуляции, при которых обеспечивается достаточное подавление оптической несущей и необходимое видоизменение спектра ИОИ.

В целом можно заключить, что, несмотря на некоторые успехи в части применения лазерных источников для ВОГ, главным образом посредством искусственного уширения их спектра, на текущий момент они все еще малопопулярны, по крайней мере как ИОИ для ВОГ навигационного класса точности. Дальнейшее развитие методов искусственного уширения спектра лазерных источников вполне вероятно позволит в ближайшие годы потеснить СЛД и ЭСИ в качестве безальтернативных ИОИ при построении высокоточных ВОГ.

## 7. Коммерчески доступные источники оптического излучения российских и зарубежных компаний

Для оценки существующего положения дел в области разработки и производства ИОИ, пригодных для использования в ВОГ, был проведен поиск и анализ информации различных зарубежных и отечественных производителей широкополосных ИОИ.

Среди ИОИ зарубежного производства были рассмотрены СЛД и ЭСИ, предлагаемые компаниями FOG Photonics Inc., Superlum (торговая марка IdealPhotonics), DenseLight Semiconductors, QPhotonics, Thorlabs, Anritsu (представитель в России – компания «Радар»), Fiberlabs Inc., Fibotec Fiberoptics GmbH, NP Photonics, Acfiber Technology Limited,

OZ Optics Limited, Amonics, LD-PD Inc., Nuphoton Technologies Inc., Optilab, Xiamen Beogold Technology Co., «ИРЭ-Полюс» (российское подразделение международной компании IPG Photonics Corporation), LasersCom (Беларусь) [48–66].

Из российских компаний интерес с точки зрения применения в ВОГ могут представлять ИОИ компаний «ТЕЛАМ», «Нолатех», ООО «ИП «НЦВО – Фотоника» [67–69].

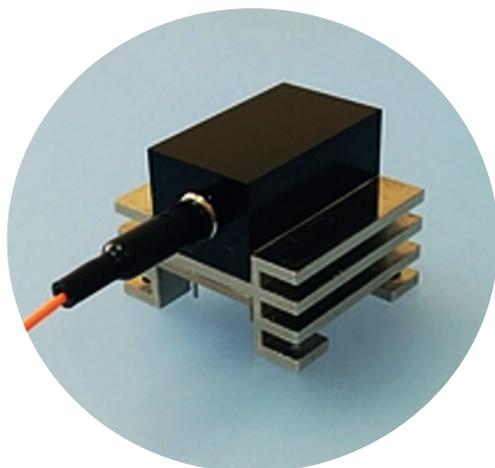
Внешний вид некоторых наиболее типичных ИОИ перечисленных выше компаний приведен на рис. 5, 6.



СЛД DL-CS5203A DenseLight Semiconductors [50]



СЛД AS5B125EM50M Anritsu [53]



СЛД ELED-1550-1 LasersCom [65]



СЛД DL-ASE-CW-CSC117A DenseLight Semiconductors [50]

Рис. 5. Некоторые наиболее типичные ИОИ типа СЛД

В табл. 3 приведены основные параметры отечественных и зарубежных ИОИ, пригодных для применения в ВОГ (с учетом проведенных авторами дополнительных исследований, описанных в [70]).

Для ИОИ из числа дополнительно изученных в табл. 3 приведены как паспортные/рекламные данные (при их наличии), так и полученные в ходе исследований (усредненные) – в скобках, второй строкой.

В целом результаты исследований оказались близки к указанным производителями паспортным данным. Различия невелики и могут быть объяснены условиями испытаний (например, изменением температуры).

В экспериментах были задействованы следующие ИОИ: СЛД SLD-1550-14BF в корпусе 14-pin butterfly производства «Нолатех», СЛД ELED-1550-1 в корпусе 14-pin DIL компании LasersCom (далее – SLD), источники широкополосного некогерентного

излучения на основе усиления спонтанной эмиссии LC-ASE-C-10 той же фирмы (далее – ASE), ЭСИ ESS-30 IRE-Polus (далее – ESS) и эрбиевый волоконный широкополосный источник ErBBLs-35-CF, выпускаемые НЦВО «Фотоника» (далее – ErBBLs).



ЭСИ SFS-1550-PM-10 FOG Photonics [48]



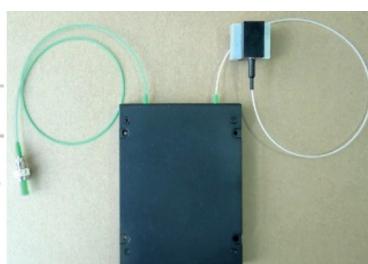
ЭСИ компании Nuphoton Technologies [61]



ЭСИ ErBBLs-35-CF-X НЦВО «Фотоника» [69]



ЭСИ ASE-C-20-MSA-3 Optilab [62]



ЭСИ LC-ASE-C-10 LasersCom [66]



Рис. 6. Некоторые наиболее типичные ИОИ типа ЭСИ

Для рассматриваемых образцов были сняты спектры излучения, исследованы форма и ширина спектров, рассчитана СДВ, измерены потребляемая и выходная оптическая мощности, в том числе в зависимости от температуры [70]. Спектральные характеристики ИОИ снимались с помощью оптического спектроанализатора. Выходная оптическая мощность измерялась с помощью либо соответствующего измерителя, либо встроенных средств (АЦП) проверяемого источника.

Таблица 3

**Основные параметры источников излучения, пригодных для применения в ВОГ**

Производитель	Модель	Параметры источников							
		Тип	СДВ, нм	Темпер. коэфф. СДВ, ppm/°C	Ширина спектра (ЗдБ), нм	Длина декогерентности, мм	Выходная опт. мощность, мВт	Ток накачки макс., мА	Диапазон рабочих температур, °C
«Нолатех»*	SLD-1550-14BF	СЛД	1532	–	30...40	–	3...5	320±20	–40...+70
			(1521)	–	(~42)	(0,055)	(5)		
НЦВО «Фотоника»*	ErBBLs-35-CF	ЭСИ	1546	–	~37	–	> 32	602	0...+45
			(1545)	(18)	(~35)	(~0,30)	(36)		
«IRE-Polus»*	ESS-30	ЭСИ	1555	–	> 20	–	20...40	1500	0...+45
			(1554)	(3)	(~26)	(~0,70)	(26)		

Производитель	Модель	Параметры источников							
		Тип	СДВ, нм	Темпер. коэфф. СДВ, ppm/°C	Ширина спектра (ЗдБ), нм	Длина декогерентности, мм	Выходная опт. мощность, мВт	Ток накачки макс., мА	Диапазон рабочих температур, °C
LasersCom*	ELED-1550-1	СЛД	1550	–	35...45	–	1	74,5±1	–40...+65
			(1525)	–	(~44)	(0,055)	(1)		
	LC-ASE-C-10	ЭСИ	1560	6	11...13	–	10	100±1	–40...+60
			(1556)	(6)	(~11)	(0,25)	(10)		
«ТЕЛАМ»	TS-1	СЛД	1550	–	50	0,05	8	500	–55...+70
	TS-2	СЛД	1550	–	50	0,05	15	800	–55...+70
FOG Photonics	FOG-SLD-1550-14BF	СЛД	1530	–	35±5	0,07±0,01	5	300	–40...+70
	SFS-1550-PM-FA-10	ЭСИ	1550	2	>10	–	>10	–	–45...+71
SUPERLUM	SLD-761-HP1-SM-1550	СЛД	1550	–	45	0,05	5	400	–55...+70
	SLD-761-HP2-SM-1550	СЛД	1550	–	45	0,05	10	600	–55...+60
DenseLight Semi-conductors	DL-CS5153A	СЛД	1550	–	35	0,07	15	350	–40...+70
	DL-CS5203A	СЛД	1550	–	35	0,07	20	450	–40...+70
	DL-CS5254A	СЛД	1550	–	40	0,06	25	450	–40...+70
	DL-ASE-CW-CSC117A	СЛД	1550	–	60	0,04	12,5	–	–20...+70
	DL-ASE-CW-CSC119A	СЛД	1550	–	80	0,03	14	–	–20...+70
	DL-ASE-CW-CSC147A	СЛД	1550	–	60	0,04	32	–	–20...+70
QPhotonics	QSDM-1550-9	СЛД	1529	–	40	0,06	11	285	0...+65
	QSDM-1550-20	СЛД	1567	–	61	0,04	20	707	0...+65
Thorlabs	SLD-1005S	СЛД	1550	–	50	0,05	22	600	0...+65
	SLD-1550S-A40	СЛД	1550	–	33	0,07	40	750	0...+65
	SLD-1550P-A40	СЛД	1550	–	33	0,07	40	750	0...+65
Anritsu	AS5B125EM50M	СЛД	1550	–	60	0,04	25	600	–20...+75
Fiberlabs	ASE-Md1550-25	ЭСИ	1550	–	30	–	25	–	0...+40
Fibotec Fiberoptics	BBS-CC 14 P5 FCP	ЭСИ	1550	–	40	–	32	–	0...+40
	BBS-CL 17 F3 FCA	ЭСИ	1568	–	80	–	50	–	0...+40
	BBS-CL 18 W3 FCA	ЭСИ	1568	–	80	–	63	–	0...+40
NP Photonics	ASE-C-M-7	ЭСИ	1545	–	40	–	5	–	–
	ASE-C-M-10	ЭСИ	1545	–	40	–	10	–	–
	ASE-C-M-13	ЭСИ	1545	–	40	–	20	–	–
Acfiber Technology	ASE-C-M-10-G	ЭСИ	1545	–	39	–	10	–	–20...+65
	ASE-C-M-13-G	ЭСИ	1545	–	39	–	20	–	–20...+65
OZ Optics	ASE-11-1529:1562-S-10	ЭСИ	1545	–	33	–	10	400	0...+40
	ASE-11-1529:1562-S-13	ЭСИ	1545	–	33	–	20	400	0...+40
Amonics	ALS-10	ЭСИ	1546	–	36	–	10	–	0...+60
	ALS-15	ЭСИ	1546	–	36	–	32	–	0...+60
LD-PD	PL-LS-A-A81-PA	ЭСИ	1550	–	40	–	10	–	–10...+50
	PL-LS-B-A81-PA	ЭСИ	1550	–	40	–	20	–	–10...+50
Nuphoton Technologies	ASE-C0-HR-15-NA	ЭСИ	1550	–	35	–	32	–	0...+65
	ASE-C4-MR-17-2	ЭСИ	1550	–	35	–	50	–	0...+65

Производитель	Модель	Параметры источников							
		Тип	СДВ, нм	Темпер. коэфф. СДВ, ppm/°C	Ширина спектра (3дБ), нм	Длина декогерентности, мм	Выходная опт. мощность, мВт	Ток накачки макс., мА	Диапазон рабочих температур, °C
Optilab	ASE-C-20-MSA-3	ЭСИ	1546	–	40	0,03	3×30	–	+10...+50
Xiamen Beogold Technology	BG-ASE-M1-C-1-10	ЭСИ	1547	–	39	–	10	–	–20...+60
	BG-ASE-M1-C-1-13	ЭСИ	1547	–	39	–	20	–	–20...+60
	BG-ASE-M1-C-1-15	ЭСИ	1547	–	39	–	32	–	–20...+60

\* С учетом дополнительных исследований. Для эрбиевых источников, функция когерентности которых имеет «боковые лепестки» (см. рис. 8), уровень декогерентности определялся при разности хода, когда все максимумы «боковых лепестков» оказывались ниже 0,03. При этом корректнее было бы для таких источников в паспорте приводить форму функции когерентности целиком. Прочерк в графах означает, что производитель не предоставил данных.

На рис. 7 в дополнение к информации, приведенной в [70], показаны для сравнения графики спектров излучения в частотной области нескольких образцов исследованных ИОИ при комнатной температуре и паспортном значении тока накачки.

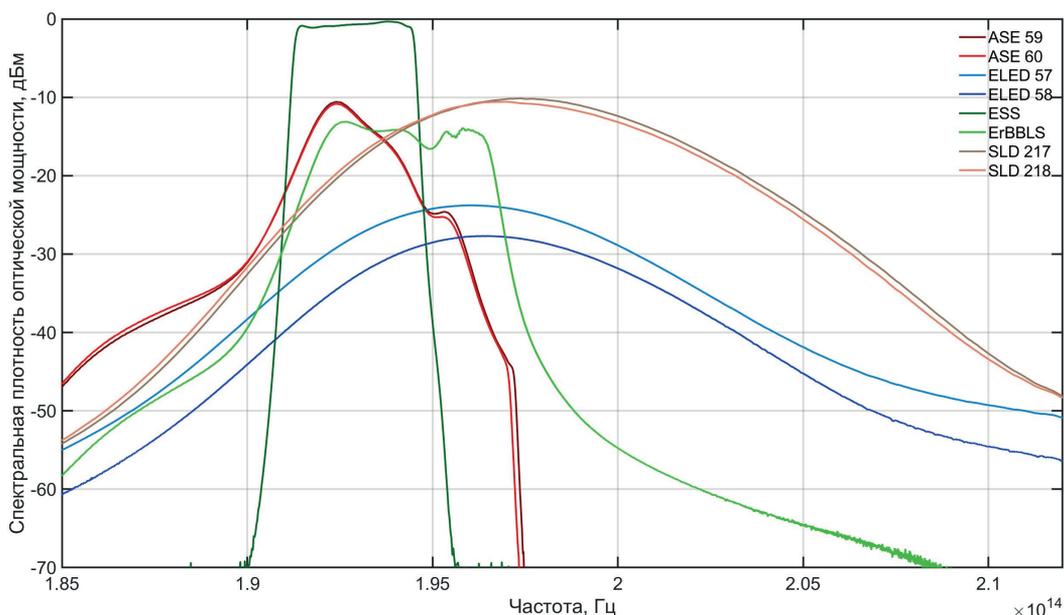


Рис. 7. Спектры оптического излучения нескольких ИОИ при комнатной температуре и паспортном значении тока накачки (по данным [70])

По построенным спектрам (с использованием результатов, полученных в [70]) были вычислены значения СДВ (по формуле (2)), рассчитана ширина спектра (по уровню –3 дБ), оценена также длина когерентности/декогерентности по графику функции когерентности рис. 8 (по уровням 0,8 и 0,03 соответственно). Производители исследованных ИОИ не предоставляли данных о функции когерентности (или о длине когерентности/декогерентности для СЛД).

На рис. 7 и на рис. П.1, П.2 (см. приложение) представлены типовые формы спектров ИОИ: гауссоподобные – у источников СЛД, столообразные (иначе говоря, близ-

кие к прямоугольным) – у эрбиевых источников с оптическим фильтром, а также близкие по форме к прямоугольным, но с «горбами» – у эрбиевых источников без оптических фильтров.

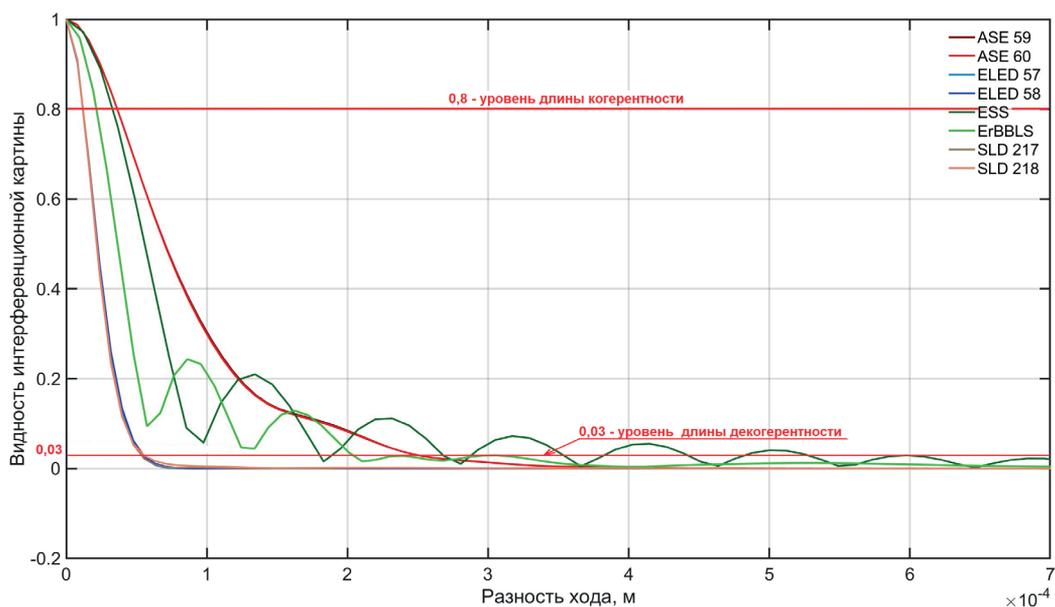


Рис. 8. Функции когерентности нескольких ИОИ при комнатной температуре и паспортном значении тока накачки (получены с использованием данных, приведенных в [70])

Из рис. 7 видно, что источники оптического излучения SLD и ELED, как и большинство СЛД, имеют форму спектра, близкую к гауссовскому распределению. Их оптическая мощность лежит в диапазоне от 1 до 5 мВт, а ширина спектра достигает 35-45 нм по уровню  $-3$  дБ у SLD, этого достаточно для использования в ВОГ.

Источники ESS и ErBBLS имеют близкую к прямоугольной форму спектра, ширина их спектра по уровню  $-3$  дБ составляет 26-35 нм, а оптическая мощность достигает 26-36 мВт, в результате для обеспечения работы трех-четырех ВОГ хватает одного ИОИ.

Источники ASE занимают промежуточное положение по величине оптической мощности (около 10 мВт), но они менее пригодны для применения в ВОГ из-за несимметричной формы спектра и недостаточной его ширины по уровню  $-3$  дБ (11-13 нм).

Необходимо отметить, что спектральные характеристики источников зависят от температуры, поэтому была также изучена температурная зависимость основных параметров нескольких доступных авторам ИОИ типа ЭСИ. В частности, для источников ESS и ErBBLS были исследованы изменения формы спектра и СДВ, обусловленные температурой.

Выяснилось [70], что у обоих источников при изменении температуры спектр остается достаточно стабильным, за исключением загибов в его форме при критически низкой ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) и критически высокой ( $+70^{\circ}\text{C}$ ) температурах. СДВ источника ESS более стабильна, чем у ErBBLS, что позволяет при использовании его в ВОГ, работающих в широком диапазоне температур, обеспечить более высокую стабильность масштабного коэффициента.

## **8. Заключение**

СЛД и ЭСИ – два типа ИОИ, применяемых в абсолютном большинстве современных ВОГ. Выбор между этими типами определяется требованиями к точностным и эксплуатационным характеристикам конечного прибора.

При выборе ЭСИ для ВОГ необходимо учитывать главным образом стабильность СДВ излучения, в том числе при изменениях температуры. Как было отмечено, нестабильность масштабного коэффициента ВОГ (в том числе температурная) напрямую зависит от нестабильности СДВ.

Длина когерентности также играет важную роль, однако оба типа ИОИ имеют, как правило, широкий спектр и достаточную длину когерентности, чтобы можно было отнести данный сравнительный критерий к разряду второстепенных.

Из полученной информации и по результатам сравнительных исследований видно, что отечественные ЭСИ не уступают зарубежным по большинству параметров и могут быть использованы в ВОГ.

С СЛД ситуация сложнее: выбор доступных моделей невелик, кроме того, они имеют недостаточную выходную оптическую мощность – существенно меньше, чем у зарубежных аналогов.

Целесообразность выбора того или иного источника определяется конкретной задачей его применения, и в этом могут помочь информация из табл. 3 и данные о форме спектров излучения (рис. П. 1, П. 2).

В тех случаях, когда к точности разрабатываемого ВОГ не предъявляются жесткие требования и в то же время важны низкая цена конечного изделия (например, системы ориентации или стабилизации), пониженное энергопотребление и компактные конструктивные решения, разумно использовать СЛД-источники. При этом необходимо уделять особое внимание ширине диапазона рабочих температур с учетом специфики сферы применения.

Важно также обращать внимание на уровень выходной оптической мощности (обычно подобные ИОИ маломощны, и для системы, содержащей три или четыре ВОГ, может понадобиться отдельный ИОИ для каждого гироскопа).

Если же необходимы высокие точности, длительный срок службы изделия, а габариты, энергопотребление и цена не столь существенны, то представляется целесообразным использовать ЭСИ, предпочтительно с максимально стабильной СДВ, наибольшей шириной спектра и минимальной длиной когерентности.

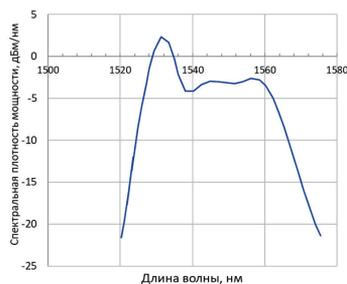
Второстепенными, но важными характеристиками являются эксплуатационный температурный диапазон и выходная оптическая мощность, в частности при обслуживании одним ИОИ нескольких ВОГ в составе навигационной системы.

Дальнейшее развитие двух основных типов ИОИ в контексте использования в разных типах ВОГ имеет несколько перспективных направлений: миниатюризация и встраивание ИОИ в состав интегрально-оптических сборок; аппаратная и/или программная стабилизация спектральных и энергетических параметров ИОИ; выявление, анализ и компенсация эффектов, обусловленных старением; повышение выходной оптической мощности.

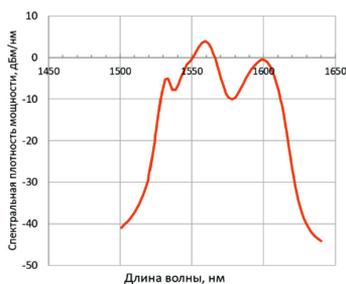
Наконец, перспективным видится применение в ВОГ лазерных ИОИ, усовершенствованных с помощью радиофотоники и других методов искусственного уширения спектра.

## Приложение: паспортные формы спектров некоторых ЭСИ по данным производителей

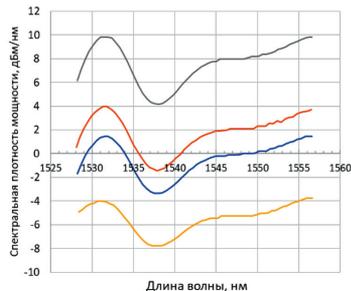
На рис. П. 1 для справки приведены паспортные формы спектров ЭСИ по данным компаний-производителей.



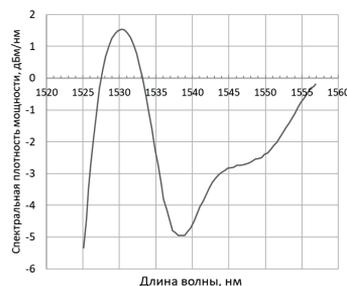
ЭСИ ASE-Md1550-25 Fiberlabs [54]



ЭСИ Fibotec Fiberoptics [55]



ЭСИ Amonics [59]



ЭСИ ASE-C-M NP Photonics [56]



ЭСИ ASE-C-GFF  
Acfiber Technology [57]



ЭСИ ASE-11-1529:1562-S OZ  
Optics [58]



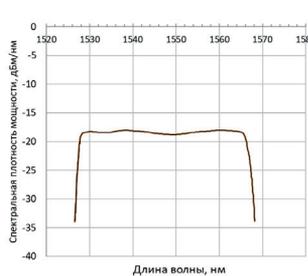
ЭСИ PL-LS-A-A81-PA(SA)  
LD-PD [60]



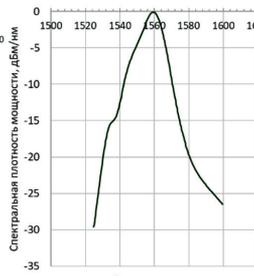
ЭСИ компании Nuphoton  
Technologies [61]



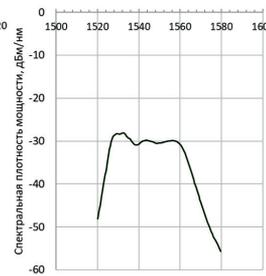
ЭСИ ASE-C-20-MSA-3  
Optilab [62]



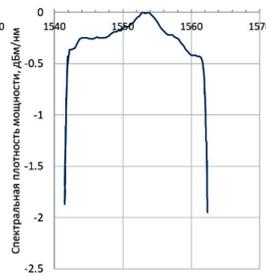
ЭСИ BG-ASE-S-C  
Xiamen Beogold Tech [63]



ЭСИ LC-ASE-C-10  
LasersCom [66]



ЭСИ EгVBLS-35-CF-X  
ИЦВО «Фотоника» [69]



ЭСИ ESS-30  
ИРЭ-Полус [64]

Рис. П. 1. Формы спектров источников ЭСИ по данным компаний-производителей (из паспортов) (по оси абсцисс – длина волны в нм, по оси ординат – спектральная плотность мощности в дБм/нм)

На рис. П. 2 приведены паспортные формы спектров источников СЛД по данным компаний-производителей.

Для SLD-761-HP2-SM-1550 компании Superlum [49] производитель также предоставил информацию о собственных пульсациях спектра источника.

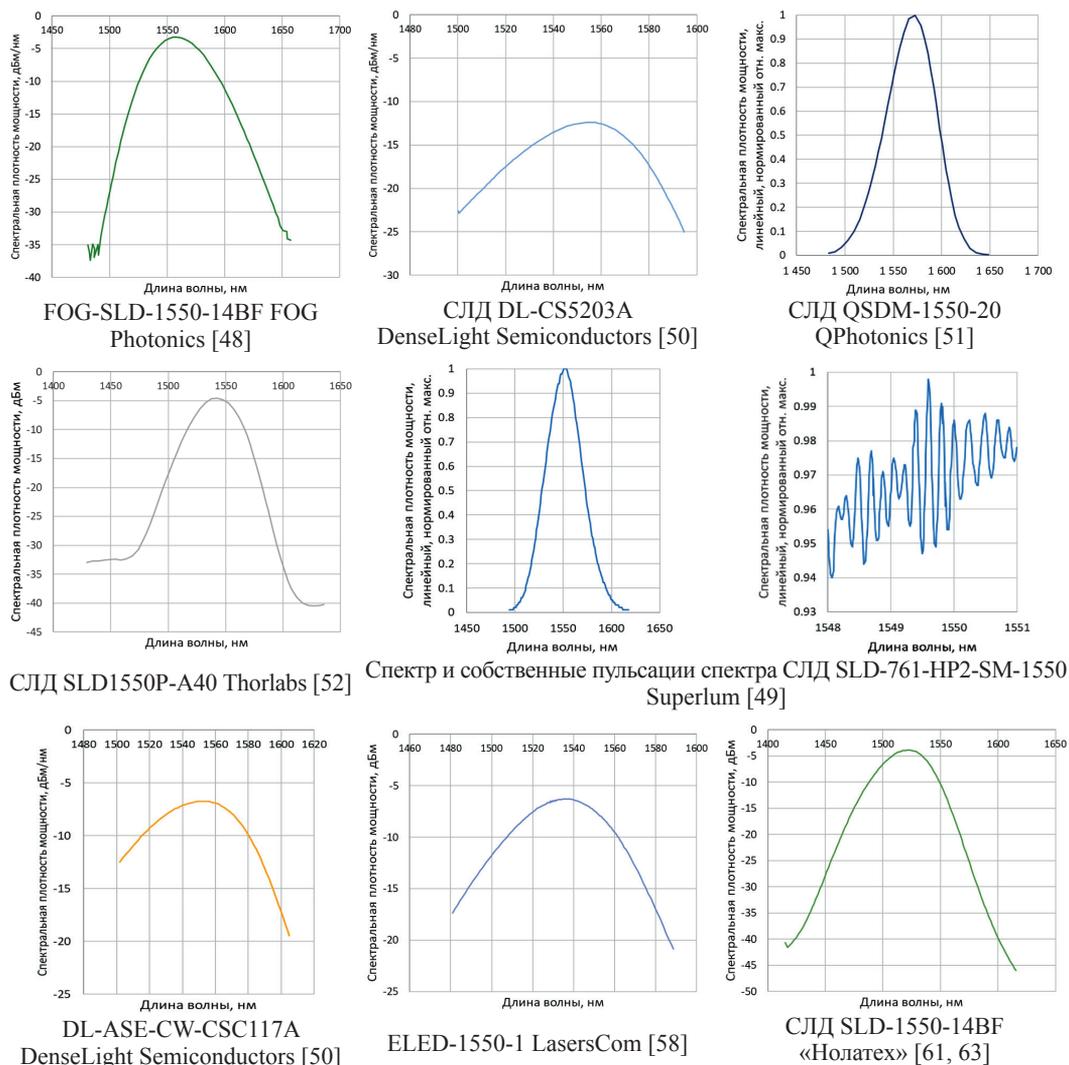


Рис. П. 2. Формы спектров источников СЛД по данным компаний-производителей (из паспортов) (по оси абсцисс – длина волны в нм, по оси ординат – спектральная плотность мощности в дБм/нм или нормированная в относительных единицах).

Примечание: на сайте компании «Нолатех» не представлены формы спектров источников, приведенный на рисунке график получен авторами при номинальном токе накачки [70]

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №2 (109). С. 3–10. DOI 10.17285/0869-7035.0028.
2. Lefevre, H.C., *The Fiber Optic Gyroscope*, 3rd ed., Norwood: Artech House Publishers, 2022, 512 p.
3. Lefevre, H.C., The fiber-optic gyroscope, a century after Sagnac's experiment: The ultimate rotation-sensing technology?, *Comptes Rendus Physique*, 2014, vol. 15, issue 10, pp. 851–858, doi 10.1016/j.crhy.2014.10.007.

4. Takada, K., Calculation of Rayleigh backscattering noise in fiber-optic gyroscopes, *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, vol. 2, issue 6, pp. 872–877.
5. Салех Б., Теїх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения: учебное пособие в 2 тт. Т. 2. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. 760 с.
6. Стригалеv В.Е., Мешковскїй И.К., Моор Я.Д. Особенности использования фазо-чувствительных устройств в волоконно-оптических измерительных системах. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 41 с.
7. Алейник А.С., Кикилич Н.Е., Козлов В.Н., Власов А.А., Никитенко А.Н. Методы построения высокостабильных эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. №4 (104). С. 593–607.
8. Nakimi, F., Moores, J.D., RIN-reduced light source for ultra-low noise interferometric fibre optic gyroscopes, *Electronics Letters*, 2013, vol. 49, no. 3, doi <https://doi.org/10.1049/el.2012.3371>.
9. Guattari, F., Chouvin, S., Molucon, C., et al., A simple optical technique to compensate for excess RIN in a fiber-optic gyroscope, *Inertial Sensors and Systems 2014*, Karlsruhe, Germany, 2014, p. 10.
10. Алейник А.С., Дейнека И.Г., Смоловик М.А., Нефоросный С.Т., Рупасов А.В. Компенсация избыточного шума в волоконно-оптическом гироскопе // Гироскопия и навигация. 2015. Т. 24. №2 (93). С. 20–32.
11. Wysocki, P.F., Digonnet, M.J.F., Kim, B.Y., Shaw, H.J., Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications, *Journal of Lightwave Technology*, 2009, vol. 12, issue 3, pp. 550–567.
12. Park, H.G., Digonnet, M.J.F., Kino, G., Er-Doped Superfluorescent Fiber Source With a  $\pm 0,5$ -ppm Long-Term Mean-Wavelength Stability, *Journal of Lightwave Technology*, 2003, vol. 21, no. 12, doi 10.1109/JLT.2003.822539.
13. Ashley, P.R., Temmen, M.G., Sanghadasa, M., Applications of SLDs in fiber optical gyroscopes, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2002, no. 4648, pp. 104–115.
14. Zheng, S., Ren, M., Luo, X., Zhang, H., Feng, G., Real-Time Compensation for SLD Light-Power Fluctuation in an Interferometric Fiber-Optic Gyroscope, *Sensors*, 2023, no. 23 (4), p. 1925.
15. Chen, X., Yang, J., Zhou, Y., Shu, X., An improved temperature compensation circuit for SLD light source of fiber-optic gyroscope, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, no. 916(1), p. 012027.
16. Vostrikov, E., Kikilich, N., Zalesskaya, Y., Aleinik, A., Smolovik, M., Deyneka, I., Meshkovskii, I., Stabilisation of central wavelength of erbium-doped fibre source as part of high-accuracy fibre optic gyroscopes, *IET Optoelectronics*, 2021, no. 15(6), pp. 287–293, doi 10.1049/ote2.12040.
17. Li, X., Li, M., Liu, C., Li, H., Yang, H., Research on light source average wavelength and crystal oscillator frequency for reducing temperature error of the FOG scale factor, *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2021, no. 242, p. 167189, doi 10.1016/j.ijleo.2021.167189.
18. Chen, X., Yan, M., Yu, J., Tang, R., Design of light source for ultrahigh precision fiber optic gyroscope, *Proc. SPIE 12062, AOPC 2021: Optoelectronics and Nanophotonics*, 1206211 (21 December 2021), doi 10.1117/12.2607120.
19. Alphonse, G.A., Hawrylo, F.Z., Harvey, M., Super-luminescent diode. U.S. Patent No. 4,821,276, 1989.
20. Chen, X., Jiang, L., Yang, M., Yang, J., Shu, X., Research on the mean-wavelength drift mechanism of SLD light source in FOG, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1300*, 2019, 012047.
21. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Лапин П.И., Мамедов Д.С., Якубович С.Д. Изменение выходных характеристик широкополосных суперлюминесцентных диодов в ходе продолжительной работы // Квантовая электроника. 2011. Т. 47. №7. С. 595–601.
22. Hsiao, C., Fang, Y., Chen, Y., Weng, Z., Chu, J., Chen, R., Dong, C., Lin, W., Chiu, Y., Fabrication of superluminescent diode (SLD) for gyro light source with broadband, high power, and large polarization-extinction ratio performance, *Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, 2020, pp. 1–3, doi 10.1109/OECC48412.2020.9273634.
23. Chen, X., Yang, J., Zhang, C., Yang, M., Jiang, L., The application of intelligent modelling system in temperature compensation of SLD light source, *Proc. SPIE 11023, Fifth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application*, 110234Z (12 March 2019), doi 10.1117/12.2520493.
24. Chen, X., Yang, J., Zhou, Y., Shu, X., An improved temperature compensation circuit for SLD light source of fiber-optic gyroscope, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 916*, 2017, 012027.
25. Shang, K., Lei, M., Xiang, Q., Na, Y., Zhang, L., Yu, H., Near-navigation-grade interferometric fiber optic gyroscope with an integrated optical chip, *Chinese Optics Letters*, 2020, vol. 18, issue 12, p. 120601.

26. Li, X., Shao, Z., Lu, J., Yuan, H., Gao, B., Gao, H., Study of high performance Fiber Optic Gyroscope based on SLD light source, *25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Guiyang, China, 2013, pp. 1459–1463, doi: 10.1109/CCDC.2013.6561156.
27. ООО НПК «Оптолинк». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.optolink.ru>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
28. АО «Физоптика». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fizoptika.ru>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
29. KVH Industries, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kvh.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
30. Кикилич Н.Е. Стабилизация параметров оптического излучения суперлюминесцентного волоконного источника для применения в волоконно-оптическом гироскопе: дисс. ... канд. тех. наук. СПб., 2018. 138 с.
31. Huang, Y., Peng, T., Wang, L., Liu, R., Performance comparison of fiber-optic gyroscopes using single pass backward and double pass backward superfluorescent fiber sources, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2009, no. 7503.
32. Falquier, D.G., Wagener, J.L., Digonnet, M.J.F., Shaw, H.J., Polarized Superfluorescent Fiber Sources, *Optical fiber technology*, 1998, 4, 453–470, Article No. OF98T0260.
33. CSRayzer Optical Technology. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.csrayzer.cn>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
34. Lumispot Technology Group. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lumispot-tech.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
35. Aubry, M., Mescia, L., Morana, A., Robin, T., Laurent, A., Mekki, J., Marin, E., Ouerdane, Y., Girard, S., Boukenter, A., Temperature Influence on the Radiation Responses of Erbium-Doped Fiber Amplifiers, *Phys. Status Solidi A*, 2021, 2100002, doi 10.1002/pssa.202100002.
36. Wan, S., Zhan, T., Hu, D., Yan, H., Han, D., An Erbium-Doped Fiber Source with Near-Gaussian-Shaped Spectrum Based on Double-Stage Energy Matching and LPFGs, *Photonics*, 2023, no. 10(5), p. 533.
37. АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elektropribor.spb.ru>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
38. ПАО ПНППК. [Электронный ресурс]. URL: <https://pnppk.ru>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
39. Exail Company. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.exail.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
40. Northrop Grumman Corporation. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.northropgrumman.com>. Дата последнего обращения: 03.10.2023.
41. Lloyd, S.W., Digonnet, M.J.F., Fan, S., Tactical-grade interferometric fiber optic gyroscope driven with a narrow-linewidth laser, *Advanced Photonics*, OSA Technical Digest (CD) Optica Publishing Group, 2011, SMC3.
42. Lloyd, S.W., Digonnet, M.J.F., Fan, S., Modeling Coherent Backscattering Errors in Fiber Optic Gyroscopes for Sources of Arbitrary Line Width, *Journal of Lightwave Technology*, 2013, vol. 31, no. 13, July 1, doi 10.1109/JLT.2013.2261283.
43. Chou, P.C., Haus, H.A., Laznicka, O.M., Pulse excited interferometric fiber-optic gyroscope, *CLEO'98*, pp. 313–314.
44. Cutler, C.C., Newton, S.A., Shaw, H.J., Limitation of rotation sensing by scattering, *Optics letters*, 1980, vol. 5, no. 11, pp. 488–490, doi 10.1364/OL.5.000488.
45. Chamoun, J., Digonnet, M.J.F., Aircraft-navigation-grade laser-driven FOG with Gaussian-noise phase modulation, *Optic Letters*, 2017, vol. 42, no. 8, pp. 1600–1603.
46. Wheeler, J.M., Chamoun, J.N., Digonnet, M.J.F., Optimizing Coherence Suppression in a Laser Broadened by Phase Modulation with Noise, *Journal of Lightwave Technology*, 2021, vol. 39, no. 9, pp. 2994–3001, doi 10.1109/JLT.2021.3061938.
47. Yan, J., Miao, L., Shen, H., Shu, X., Huang, T., Che, S., Low-Drift Closed-Loop Fiber Optic Gyroscope of High Scale Factor Stability Driven by Laser with External Phase Modulation, *Photonic Sensors*, 2022, vol. 12, issue 3, id. 220304.
48. FOGphotonics, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fogphotonics.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
49. Superlum Company. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.superlumdiodes.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
50. DenseLight Semiconductors. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.denselight.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.

51. **QPhotonics, LLC.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qphotonics.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
52. **Thorlabs Inc.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thorlabs.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
53. **Anritsu Company.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anritsu.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
54. **Fiberlabs Inc.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fiberlabs.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
55. **Fibotec Fiberoptics.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fibotec.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
56. **NP Photonics.** [Электронный ресурс]. URL: <http://www.npphotonics.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
57. **Acfiber Technology Limited.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.acfiber.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
58. **OZ Optics Limited.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ozoptics.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
59. **Amonics Company.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.amonics.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
60. **LD-PD Inc.** [Электронный ресурс]. URL: <http://ld-pd.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
61. **Nuphoton Technologies Inc.** [Электронный ресурс]. URL: <https://nuphoton.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
62. **Optilab Company.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.optilab.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
63. **Xiamen Beogold Technology Co., Ltd.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.beogold.com>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
64. **ООО НТО «ИРЭ-Полюс».** Протокол сборки ESS-30. Результаты тестирования, 2018.
65. **ООО «Лазерском».** Суперлюминесцентный диод ELED-1550-1. [Электронный ресурс]. URL: [https://laserscom.com/sites/default/files/pdf/eled-1550-1\\_0.pdf](https://laserscom.com/sites/default/files/pdf/eled-1550-1_0.pdf). Дата последнего обращения: 03.04.2024.
66. **ООО «Лазерском».** Суперлюминесцентный волоконный источник LC-ASE-C-10. [Электронный ресурс]. URL: [https://laserscom.com/sites/default/files/pdf/lc-ase-c-10\\_1.pdf](https://laserscom.com/sites/default/files/pdf/lc-ase-c-10_1.pdf). Дата последнего обращения: 03.04.2024.
67. **НПО «ТЕЛАМ».** [Электронный ресурс]. URL: <http://telam.ru>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
68. **АО «Нолатех».** [Электронный ресурс]. URL: <http://nolatech.ru>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
69. **ООО ИП «НЦВО – Фотоника».** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forc-photonics.ru>. Дата последнего обращения: 03.04.2024.
70. **Егоров Д.А., Ключникова Е.Л.** Результаты сравнительных исследований источников оптического излучения для волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. №4 (119). С.184–192.

---

Egorov, D.A., Klyuchnikova, E.L., Untilov, A.A., (Concern «CSRI «Elektropribor», JSC, Saint-Petersburg), Aleynik, A.S., Volkovskiy, S.A., Kuznetsov, V.N., Oshlakov, V.S., Pogudin, G.K. (ITMO University, Saint-Petersburg), Liokumovich, L.B. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg) Light Sources for Fiber-Optic Gyroscopes, *Гироскопия и Навигация*, 2024, vol. 32. no. 2, pp. 8–34.

**Abstract.** The light source is one of the key components of fiber optic gyroscopes (FOGs) since its optical parameters determine FOG performance, including the stability of the scale factor and zero bias. In this paper we consider the main types of light sources that are most suitable for FOGs. We describe the design principles and relevant technical characteristics of such sources, review commercially available sources, and provide a brief assessment of the prospects for the development of light sources in the context of fiber optic gyroscopy

**Key words:** light sources, spectral characteristics, fiber optic gyroscope (FOG), scale factor stability.

Материал поступил 20.02.2024