

◆ КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ ◆

УДК 531.383:621.375.8
DOI 10.17285/0869-7035.00111

Д. А. ЕГОРОВ, Е. Л. КЛЮЧНИКОВА

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Одним из ключевых компонентов волоконно-оптических гироскопов является источник оптического излучения. Характеристики волоконно-оптических гироскопов, в том числе стабильность масштабного коэффициента и смещение нуля, напрямую связаны с параметрами выходного излучения источника. Хотя в настоящее время на рынке представлено множество моделей источников излучения, потенциально пригодных для применения в волоконно-оптических гироскопах, в свете необходимости импортозамещения задача выбора источника представляется достаточно актуальной. Цель данной работы – проведение сравнительных исследований образцов источников оптического излучения различных производителей, включая измерение и анализ формы и ширины спектра, средневзвешенной длины волны, выходной оптической и потребляемой мощности.

Ключевые слова: источники оптического излучения для волоконно-оптических гироскопов, сравнительные исследования.

Введение

На протяжении последних десятилетий одной из важных целей исследований в области волоконной оптики является разработка инерциальных датчиков. К таковым относится волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) на эффекте Саньяка, который составляет серьезную конкуренцию традиционным механическим и лазерным гироскопам ввиду высокой надежности, широкого динамического диапазона, большого срока службы, низкого энергопотребления, небольшой массы и низкой стоимости [1, 2].

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

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

Статья по докладу на 15-й Мультиконференции по проблемам управления, 2022 г.

Один из ключевых компонентов ВОГ – источник оптического излучения. В работе приведены результаты сравнительных исследований некоторых образцов широкополосных источников оптического излучения различных производителей.

Исследуемые источники оптического излучения и влияние их параметров на характеристики волоконно-оптического гироскопа

При выборе источника оптического излучения для ВОГ обычно опираются на такие критерии, как:

- средневзвешенная длина волны излучения (как правило, около 1550 нм);
- ширина спектра излучения (желательно не менее 20 нм) и его форма (желательно близкая к гауссовскому распределению);
- достаточный уровень выходной оптической мощности и неполяризованность выходного излучения (для снижения рассеяний и отражений и других паразитных эффектов в волоконном контуре ВОГ);
- длительный срок эксплуатации, соответствующий сроку эксплуатации ВОГ [3, 4].

Учитывая указанные критерии, наиболее подходящими источниками оптического излучения для ВОГ являются широкополосные источники на основе усиления спонтанной эмиссии (ASE) [2–6] и суперлюминесцентные диоды (SLD) [7–10].

Характеристики ВОГ, в том числе стабильность масштабного коэффициента и смещения нуля, напрямую связаны со стабильностью спектральных характеристик выходного излучения источника [2–6]. При вращении ВОГ между световыми волнами, встречно распространяющимися в волоконно-оптическом контуре (катушке), возникает разность фаз Саньяка $\Delta\varphi$, рад, которая пропорциональна действующей угловой скорости Ω , рад/с и которую можно определить по следующей формуле [2]:

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

где λ – средневзвешенная длина волны источника излучения, м;
 $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; R – радиус катушки, м; L – длина волокна, м.

Средневзвешенную длину волны λ можно рассчитать на основании спектра источника излучения $P(\lambda)$ по формуле [7]

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i P(\lambda_i)}{\sum_{i=1}^n P(\lambda_i)}, \quad (2)$$

где сумма берется по n интервалам разбиения анализируемого спектра ($i = 1 \dots n$), P – оптическая мощность, Вт.

Исследование источников в нормальных климатических условиях

В рамках работы исследованиям подвергались следующие источники:

- суперлюминесцентные диоды SLD за №№ SLD 216, SLD 217, SLD 218 в корпусе 14-pin «butterfly» производства компании «Нолатех» (далее – SLD) [11];
- суперлюминесцентные диоды ELED за №№ ELED 57, ELED 58 в корпусе 14pinDIL производства компании ООО «Лазерском» (далее – ELED) [12];

- источники широкополосного некогерентного излучения на основе усиления спонтанной эмиссии ASE за №№ ASE 59, ASE 60 производства компании ООО «Лазерском» (далее – ASE) [13];
- эрбиевый волоконный широкополосный источник ErBBLs типа ASE за №02 компании НЦВО «Фотоника» (далее – ErBBLs) [14];
- для сравнения – зарубежный эрбиевый источник ESS типа ASE за №01 (далее – ESS).

Основные параметры исследуемых источников оптического излучения в нормальных климатических условиях сведены в табл. 1 (по паспортным данным, подтвержденным измерениями).

Таблица 1

Основные параметры исследованных источников излучения

| Производитель, модель источника | Номер | Параметры источников | | | | | |
|---------------------------------|---------|----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--|------------------------------|--|
| | | Средневзвешенная длина волны, нм | Ширина спектра, нм | Выходная оптическая мощность, мВт | Потребляемая мощность, Вт | Ток накачки (паспортный), мА | Срок службы, лет, время наработки до отказа, ч |
| НПО «Нолатех», SLD | SLD 216 | 1530 | 43 | 5 | 2,3 | 340 | 10000–40000 ч (по данным публикаций) |
| | SLD 217 | 1518 | 41 | 5 | | 307 | |
| | SLD 218 | 1522 | 43 | 5 | | 310 | |
| ООО «Лазерском», ELED | ELED 57 | 1529 | 25 | 1 | 1,3 | 73,7 | нет данных |
| | ELED 58 | 1526 | 25 | 1 | | 75,5 | |
| ООО «Лазерском», ASE | ASE 59 | 1558 | 29 | 10 | 1,3 | 100 | нет данных |
| | ASE 60 | 1558 | 29 | 10 | | 99 | |
| ESS (зарубежного производства) | 01 | 1555 | 26 | 26 | 6,5 | 920 | 12 лет; 100000 ч |
| НЦВО «Фотоника», ErBBLs | 02 | 1554 | 35 | 26 | 3,5-5,5 (в зависимости от температуры среды) | 602 | 91135 ч |

Для рассматриваемых образцов были сняты спектры излучения, исследованы их форма и ширина, рассчитана средневзвешенная длина волны, измерены потребляемая и выходная оптическая мощности, в том числе в зависимости от температуры.

Спектральные характеристики источников оптического излучения снимались с помощью оптического спектроанализатора. На рис. 1 показана схема для измерения спектров оптического излучения. Выходная оптическая мощность измерялась либо с помощью измерителя оптической мощности, либо встроенными средствами (АЦП) проверяемого источника.

Первоначально были сняты спектры излучения всех исследуемых источников при комнатной температуре и паспортном значении тока накачки (рис. 2). По построенным спектрам определялись средневзвешенная длина волны (по формуле (2)) и проверялась ширина спектра по уровню –3 дБ.

Из рис. 2 и табл. 1 видно, что у источников оптического излучения SLD и ELED форма спектра близка к гауссовскому распределению. При этом спектры источников

SLD 217 и SLD 218 практически совпали, как и источников оптического излучения ASE 59 и ASE 60. Наибольшую выходную оптическую мощность имеет источник ESS, а наименьшую – SLD 216. Наиболее широкий спектр имеют источники SLD (порядка 40 нм), а самый узкий спектр – у ELED и ESS (порядка 25 нм).

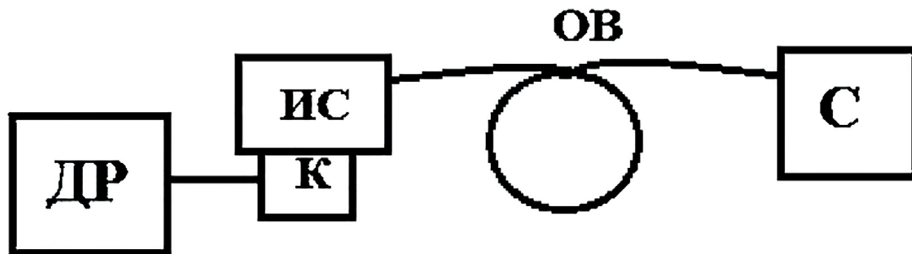


Рис. 1. Схема установки для измерения спектров оптического излучения:
 ДР – лабораторный драйвер (регулируемый источник постоянного тока), К – коммутационная колодка (переходная плата для подключения источника излучения к лабораторному драйверу),
 ИС – источник излучения, ОВ – оптическое волокно, С – спектроанализатор

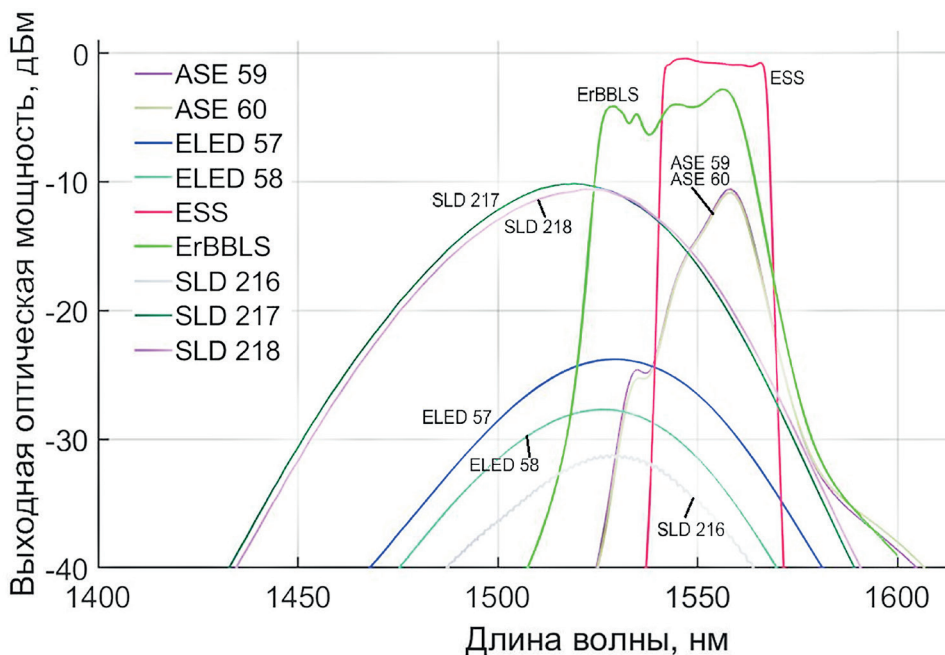


Рис. 2. Спектры оптического излучения нескольких источников при комнатной температуре и паспортном значении тока накачки (здесь для наглядности оптическая мощность выражена в дБм)

Исследование зависимости параметров источников от тока накачки

Далее исследовалась зависимость спектральных характеристик и выходной оптической мощности источников от величины тока накачки (только для тех источников, ток накачки которых можно было изменять). На рис. 3 показаны примеры зависи-

мостей средневзвешенной длины волны от тока накачки для различных источников (кроме ESS и EгBBLs, у которых ток накачки не регулируется). На рис. 4 приведены зависимости оптической мощности от тока накачки источников (кроме ESS и EгBBLs, у которых ток накачки не регулируется, а выходная оптическая мощность стабилизируется автоматически).

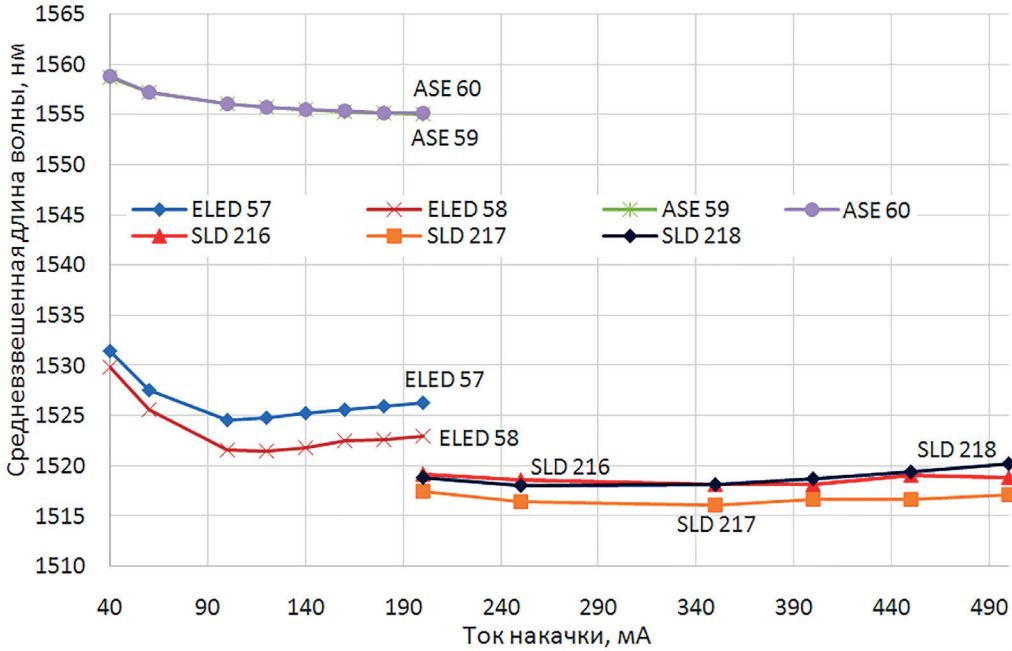


Рис. 3. Зависимость средневзвешенной длины волны излучения на выходе источников ASE (образцы ASE 59 и ASE 60), ELED (образцы ELED 57 и ELED 58) и SLD (образцы SLD 216, SLD 217, SLD 218) от тока накачки

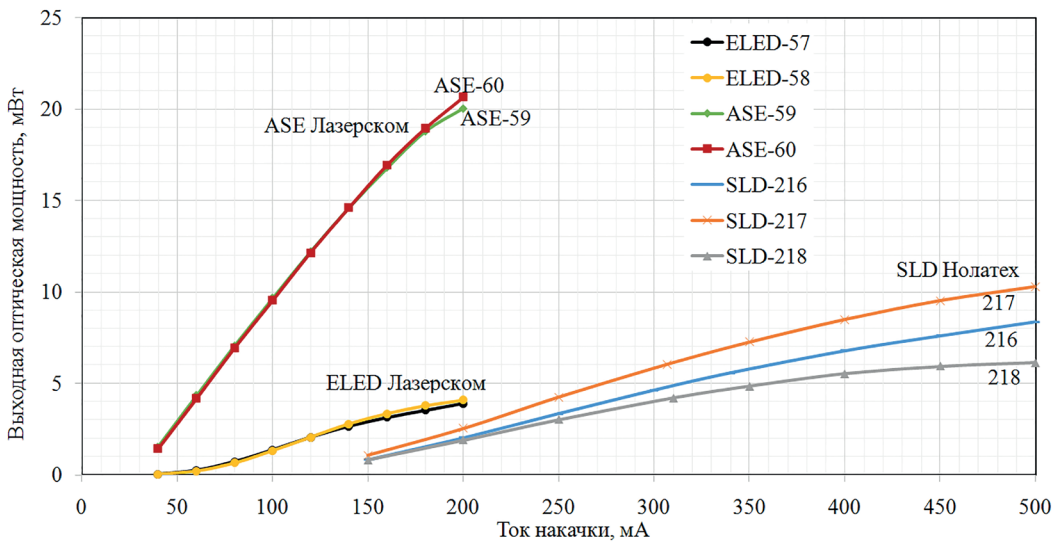


Рис. 4. Зависимость выходной оптической мощности источников ASE и ELED от тока накачки

Из рис. 3 видно, что наибольшую средневзвешенную длину волны имеют источники оптического излучения образцов ASE 59, 60 и ее зависимость от тока достаточно линейна, как и у источников SLD. Как видно из рис. 4, источники ASE обеспечивают наибольшую выходную оптическую мощность при относительно небольших токах накачки. У источников оптического излучения SLD оптическая мощность растет медленнее, чем у ELED, но при одних и тех значениях тока накачки выходная оптическая мощность у источников типа ELED больше.

Исследование температурной зависимости параметров источников

Необходимо отметить, что спектральные характеристики источников изменяются при воздействии изменений температуры, поэтому были проведены исследования температурной зависимости основных параметров источников.

Для ESS и ErBBLs была исследована зависимость изменения формы спектра и средневзвешенной длины волны от температуры (для других источников такие исследования планируется провести в будущем). На рис. 5–7 представлены полученные результаты.

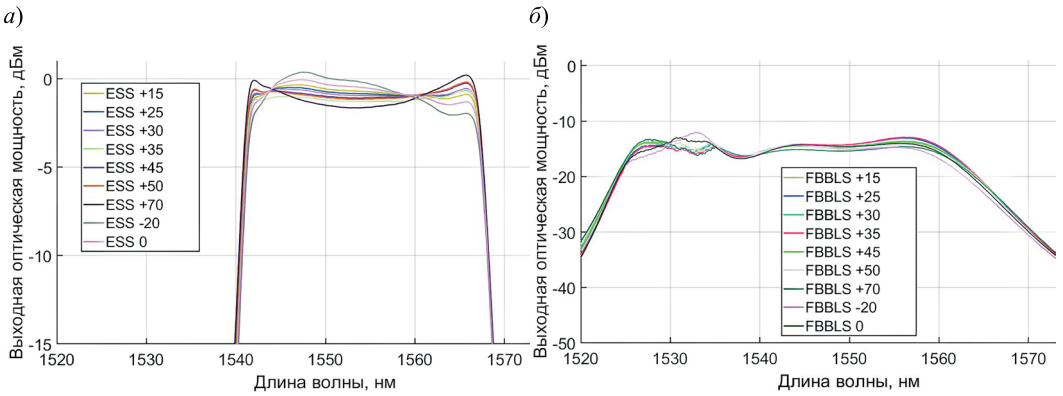


Рис. 5. Изменение формы спектра под влиянием температуры для источников типа ESS (а) и ErBBLs (б)

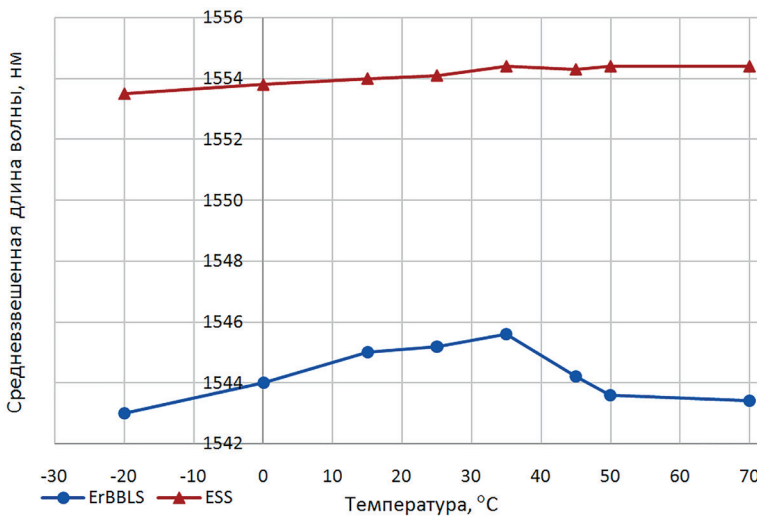


Рис. 6. Изменение средневзвешенной длины волны излучения под влиянием температуры для источников типа ESS и ErBBLs

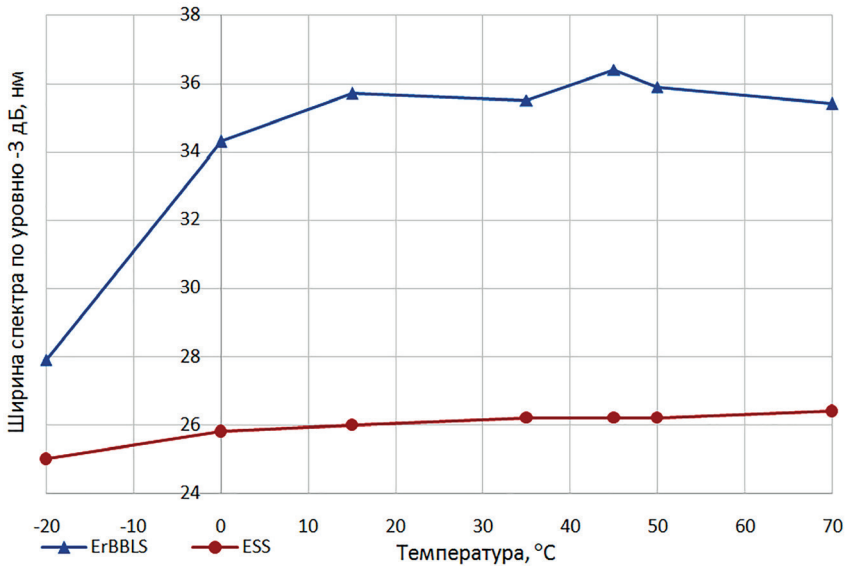


Рис. 7. Изменение ширины спектра по уровню -3 дБ под влиянием температуры для источников типа ESS и ErBBLS

Из рис. 5 видно, что у обоих исследованных источников достаточно стабильный спектр при изменении температуры, не считая загибов при критически низкой (-20°C) и критически высокой ($+70^{\circ}\text{C}$) температурах. Оба источника имеют широкий спектр (порядка 25–35 нм по уровню -3 дБ).

Были рассчитаны также средние значения средневзвешенной длины волны по формуле

$$\lambda_{\text{ср.взв.}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{\text{ср.взв.}i}}{n}, \quad (3)$$

где сумма берется по n интервалам разбиения анализируемого температурного диапазона ($i=1\dots n$), $\lambda_{\text{ср.взв.}i}$ — средневзвешенная длина волны.

Для источника оптического излучения ESS среднее значение средневзвешенной длины волны в температурном диапазоне от -20°C до $+70^{\circ}\text{C}$ составило 1554,1 нм, а для ErBBLS — 1544,25 нм.

По рис. 6 можно сделать вывод, что средневзвешенная длина волны излучения у источника ESS более стабильна, чем у ErBBLS.

Из рис. 7 следует, что спектр (по уровню -3 дБ) у источника оптического излучения ErBBLS становится шире при росте температуры, а у ESS изменение ширины спектра по уровню -3 дБ имеет достаточно линейный характер. Изменение ширины спектра составило менее 25% для источника оптического излучения ErBBLS, а для ESS — не более 6%.

Заключение

В результате проведенных исследований для нескольких образцов широкополосных источников оптического излучения (ASE, SLD) различных производителей были измерены спектральные характеристики, потребляемая и выходная оптическая мощности, проведен сравнительный анализ характеристик.

При изменении тока накачки средневзвешенная длина волны более линейно меняется у источников оптического излучения типа SLD и ASE. Наибольшее значение средневзвешенной длины при одном значении тока накачки имеет источник ASE. Источник оптического излучения ELED может работать на достаточно низких токах, но, с другой стороны, при одном и том же значении тока накачки наибольшее значение выходной оптической мощности имеет источник типа ASE.

Форма спектров у источников оптического излучения ESS и ErBBLs существенно не меняется при изменении температуры, за исключением критически низкой и критически высокой температур. Изменение ширины спектра и средневзвешенной длины волны имеет линейный характер в рабочем диапазоне температур. Изменения ширины спектра по уровню -3 дБ и средневзвешенной длины волны у источника ESS находятся в пределах погрешности измерений. По источникам типа SLD температурные исследования планируется провести в будущем.

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*, Norwood: Artech House Publishers, 2014, 440 p.
3. 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.
4. 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*, 15(6), 287–293 (2021), doi 10.1049/ote2.12040.
5. 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*, 242 (2021) 167189, doi 10.1016/j.ijleo.2021.167189.
6. 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.
7. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения: учебное пособие в 2-х тт. Т. 1. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. 760 с.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. АО «Нолатех». Суперлюминесцентный диод SLD-1550-14BF. [Электронный ресурс]. URL: <http://nolatech.ru/files/datasheet/SLD-1550-14BF.pdf>. Дата последнего обращения: 09.10.2022.
12. ООО «Лазерском». Суперлюминесцентный диод ELED-1550-1. [Электронный ресурс]. URL: https://laserscom.com/sites/default/files/pdf/eled-1550-1_0.pdf. Дата последнего обращения: 09.10.2022.
13. 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. Дата последнего обращения: 09.10.2022.
14. ООО ИП «НЦВО – Фотоника». Широкополосные оптические источники ASE Er-BBLS-35-CF-X. [Электронный ресурс]. URL: https://www.forc-photonics.ru/en/fiber_broadband_sources/er_cbnd/1/235. Дата последнего обращения: 09.10.2022.

Egorov, D.A., Klyuchnikova, E.L. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, Russia)
Results of Comparative Study of Light Sources for Fiber Optic Gyroscopes, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 4 (119), pp. 184–192.

Abstract. Light source is one of the key components of fiber optic gyroscopes. The performance of these gyros, including their scale factor and bias stability depend directly on the parameters of the light source output. Although the modern market offers a variety of light sources potentially suitable for fiber optic gyros, it seems quite challenging to choose a proper light source. The objective of this paper is to study and compare the light sources made by various companies, in particular, to measure and analyze the pattern and width of their spectra, weighted average wavelength, the output optical power, and the power consumption. A comprehensive comparative analysis of the obtained characteristics of the sources has been carried out.

Key words: light sources for fiber optic gyros, comparative study

Материал поступил 06.09.2022