



УДК 621.375.8

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ЭРБИЕВЫХ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ВОЛОКОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.С. Алейник^а, Н.Е. Кикилич^а, В.Н. Козлов^а, А.А. Власов^а, А.Н. Никитенко^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: kikilich@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.04.16, принята к печати 27.05.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-593-607

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: 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. С. 593–607. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-593-607

Аннотация

Представлен обзор методов построения широкополосных эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения, преимущественно для применения в волоконно-оптических гироскопах навигационного класса точности. Для применения в волоконно-оптических гироскопах навигационного класса точности источник оптического излучения должен обладать малой длиной когерентности, что позволяет уменьшить ошибки в выходном сигнале волоконно-оптического гироскопа, вызванные паразитными эффектами, такими как обратное рэлеевское рассеяние, перекачка мод в оптических элементах, эффект Керра. В связи с этим важными параметрами источника оптического излучения является стабильность центральной длины волны во времени и в широком диапазоне температур. Форма спектра должна быть приближена к распределению Гаусса для минимизации функции временной когерентности. Рассматриваются основные источники нестабильностей выходного оптического излучения эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения и наиболее эффективные методы стабилизации и оптимизации их спектральных параметров. В статье рассматриваются разнообразные методы корректирования спектра выходного оптического излучения, проблема остаточной поляризации выходного оптического излучения, принцип работы и устройство эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения, основные схемы построения эрбиевых источников оптического излучения, а также эрбиевые активные волокна, применяемые для создания эрбиевых источников оптического излучения. Делаются выводы о наиболее эффективных методах стабилизации выходного оптического излучения.

Ключевые слова

эрбиевый источник, суперлюминесцентный источник, стабилизация центральной длины волны, стабилизация мощности излучения, температурная зависимость, стабилизация спектра излучения, легированные волокна, функция когерентности, стабилизация источника излучения, деполаризованное излучение

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.578.21.0109 от 27.10.2015 г.).

HIGH-STABLE ERBIUM SUPERLUMINESCENT FIBER OPTICAL SOURCES CREATION METHODS

A.S. Aleynik^а, N.E. Kikilich^а, V.N. Kozlov^а, A.A. Vlasov^а, A.N. Nikitenko^а^а Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

Corresponding author: kikilich@mail.ru

Article info

Received 13.04.16, accepted 27.05.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-593-607

Article in Russian

For citation: Aleynik A.S., Kikilich N.E., Kozlov V.N., Vlasov A.A., Nikitenko A.N. High-stable Erbium superluminescent fiber optical sources creation methods. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 593–607. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-593-607

Abstract

We present the overview of wideband Erbium doped superluminescent fiber sources (EDSFS) creation methods. This type of optical sources is mainly used in navigation accuracy class fiber-optical gyroscopes (FOG) production. For this application an optical source should have small coherence length to reduce FOG output signal error rate. Output signal errors are caused by different parasitic effects: reverse Rayleigh scattering, optical components mode swapping, Kerr effect. Consequently, the most important characteristics of EDSFS are central wavelength time and wide temperature range stability and optical spectrum width and shape. The spectrum shape is needed to be close to the Gaussian distribution to minimize time coherence function. The paper deals with major EDSFS instability reasons and their most effective spectral parameters stabilization and optimization methods. We consider various methods of output optical radiation spectrum correction, and problems connected with output radiation residual polarization, the EDSFS principle of operation, structure and their basic construction schemes, the overview of Erbium-doped active fibers for EDSFS creation. The conclusions on most effective output optical radiation stabilization methods are drawn.

Keywords

Erbium doped source, superluminescent source, central wavelength stabilization, optical power stabilization, temperature relation, optical spectrum stabilization, optical fiber alloying, coherence function, optical source stabilization, depolarized light

Acknowledgements

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement No 14.578.21.0109 dated 27.10.2015).

Введение

Суперлюминесцентные волоконные источники оптического излучения (СВИОИ) находят широкое применение во многих областях науки и техники: в телекоммуникациях, рефлектометрии, медицине, волоконно-оптических гироскопах и других устройствах, для работы которых необходим сигнал с низкой временной и высокой пространственной когерентностью. В волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) навигационного класса точности используются СВИОИ, построенные на основе оптического волокна, легированного ионами эрбия. Такие одномодовые волокна используются в последние годы для создания волоконных лазеров и оптических усилителей, работающих в волоконно-оптических линиях связи в области длин волн 1,55 мкм. Эрбиевые СВИОИ (ЭСВИОИ) позволяют генерировать практически деполаризованное выходное оптическое излучение (менее 1%), достаточно высокой мощности (более 10 мВт), с малой длиной временной когерентности (менее 1 мм), с широким (более 20 нм), непрерывным, стабильным во времени и в диапазоне температур спектром без линейчатой структуры продольных мод. Срок службы таких приборов составляет более 10 лет, что является их несомненным достоинством при использовании в схемах волоконно-оптических датчиков, построенных на базе согласованных интерферометров, таких как ВОГ [1–4]. Благодаря использованию ЭСВИОИ в качестве широкополосного источника оптического излучения в ВОГ удастся добиться повышения его чувствительности.

В качестве источника оптического излучения для ВОГ ЭСВИОИ, наряду со своими преимуществами, имеют и ряд недостатков, к которым можно отнести температурную нестабильность формы спектра излучения и центральной длины волны, напрямую входящую в формулу определения масштабного коэффициента и оказывающую непосредственное влияние на точность показаний ВОГ. Оптическое излучение ЭСВИОИ обладает достаточно высокой степенью поляризации выходного оптического излучения, к чему чувствительны ВОГ, оптическое излучение для которых должно иметь высокую степень деполаризации, в противном случае это может привести к ошибке в его показаниях и, как следствие, снизить его точность [2]. Малая длина когерентности ЭСВИОИ позволяет уменьшить ошибки в выходном сигнале ВОГ, вызванные паразитными эффектами, такими как обратное рэлеевское рассеяние, перекачка поляризационных мод в оптических элементах, эффект Керра, обратные отражения на стыках оптических элементов и др. [3]. В связи с этим необходимо иметь узкую функцию временной когерентности выходного оптического излучения ЭСВИОИ, которая достигается за счет увеличения ширины спектра, формируемого источником оптического излучения, и приближения его формы к распределению Гаусса [1].

ЭСВИОИ имеют схожую конструкцию с эрбиевыми волоконными усилителями оптического излучения (ЭВУОИ), используемыми в волоконных линиях связи, поэтому часто строятся с применением их элементной базы. По таким усилителям существует множество монографий и обзоров, и наиболее схожие, раскрывающие описанные выше проблемы, представлены в работах [5–9].

Суперлюминесцентные волоконные источники оптического излучения

Создание эрбиевого суперлюминесцентного волоконного источника оптического излучения, а также эрбиевого суперлюминесцентного волоконно-оптического усилителя стало возможно благодаря уникальной структуре энергетических уровней трехвалентного иона эрбия Er^{+3} . Переход между энергетическими уровнями эрбия $^4I_{13/2}$ и $^4I_{15/2}$ идеально подходит для генерации с наименьшими оптическими потерями в кварцевых волокнах в области длин волн 1,55 мкм [10]. Принцип работы ЭСВИОИ основан на явлении усиленного спонтанного излучения. Возможность генерации и усиления света в световодах,

легированных ионами эрбия, обусловлена схемой уровней энергии данного редкоземельного элемента, представленной в упрощенном виде на рис. 1.

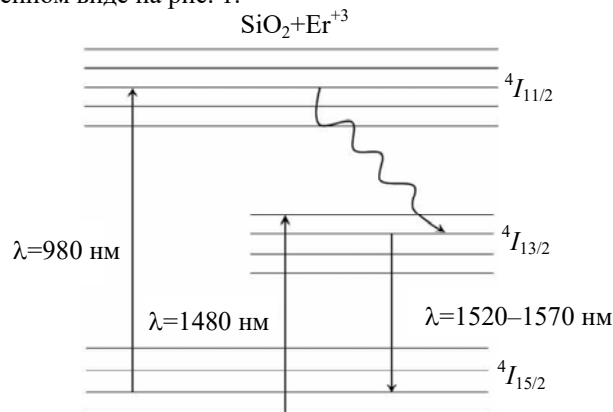


Рис. 1. Энергетические уровни иона эрбия. λ – длина волны излучения ионов эрбия

Каждый из энергетических уровней эрбия расщеплен на ряд подуровней из-за взаимодействия ионов эрбия с внутрикристаллическим полем кварцевого стекла (эффект Штарка). Под действием излучения за счет поглощения фотонов накачки ионы эрбия переходят из основного состояния $^4I_{15/2}$ в верхнее возбужденное состояние $^4I_{11/2}$, которое является короткоживущим (время жизни порядка 1 мкс), и за счет процессов релаксации переходят в долгоживущее состояние на метастабильный уровень $^4I_{13/2}$. Метастабильность в данном случае означает, что время пребывания иона эрбия на этом уровне энергии относительно велико (порядка 10 мс). Исходя из этого, число ионов, находящихся на уровне $^4I_{13/2}$, при соответствующей мощности накачки может превышать число ионов на уровне $^4I_{15/2}$. Уровень $^4I_{15/2}$ называется основным состоянием, так как в отсутствие накачки практически все ионы эрбия находятся на этом энергетическом уровне. Доля частиц, находящихся на остальных уровнях, в отсутствие накачки мала [4, 11]. Наибольшая эффективность использования накачки достигается на длинах волн 980 нм и 1480 нм. Несколько метров легированного ионами эрбия кварцевого волокна в совокупности с диодом накачки дают генерацию излучения в диапазоне длин волн 1520–1570 нм. Различные добавки в кварцевое стекло изменяют характер штарковского расщепления уровней энергии ионов эрбия, что приводит к изменению спектров поглощения и излучения. Более подробно особенности работы излучателей на основе редкоземельных элементов, в том числе на основе ионов эрбия, описаны в работах [9, 12].

Основными элементами ЭСВИОИ являются лазер накачки (980/1480 нм), активное волокно и оптический разветвитель. Волокно излучает в обе стороны – сонаправленно и противоположно накачке [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Существует несколько схем накачки легированного эрбием волокна. Накачка может осуществляться в прямом и обратном направлении по отношению к сигналу. Существует также двунаправленная накачка, где волокно накачивается с двух сторон одновременно. Основные виды схем накачки активного эрбиевого волокна схематически изображены на рис. 2.

Двухпроходная схема позволяет использовать два источника накачки, повышая суммарную выходную мощность. Обычно для противоположной накачки используется длина волны 1480 нм, а для сонаправленной накачки – 980 нм. Накачка на длине волны 1480 нм имеет более высокую квантовую эффективность, но и более высокий коэффициент шума, тогда как накачка на 980 нм может обеспечить более низкий коэффициент шума. Для более эффективного использования накачки в одно из плеч селективного ответвителя ставится отражатель, что позволяет использовать сонаправленное накачке излучение вместе с противоположенным, при этом выходная оптическая мощность ЭСВИОИ существенно возрастает. Оптимальная длина световода, обеспечивающая максимальный КПД, короче в однопроходных ЭСВИОИ. Главный недостаток двухпроходных схем заключается в том, что наличие зеркала усиливает чувствительность схемы к обратному отражению, что приводит к ужесточению требований на применение данных источников или на параметры выходного изолятора. В двухпроходных ЭСВИОИ также может потребоваться установка изолятора на выходе источника накачки для блокирования встречного излучения от другого диода [11]. Обобщенная оптическая схема ЭСВИОИ представлена на рис. 3.

Одной из ключевых сфер применения высокостабильных ЭСВИОИ являются наиболее чувствительные и точные волоконно-оптические фазовые датчики, к которым относится ВОГ. ВОГ представляет собой датчик угловой скорости в инерциальном пространстве, действие которого основано на эффекте Саньяка. Уже несколько десятилетий ВОГ успешно применяются в системах навигации, ориентации и стабилизации. Непрерывное совершенствование технологий производства волоконно-оптических элементов приводит к все большему расширению области их применения, и ужесточению требований к параметрам ВОГ, таким как разрешающая способность, дрейф выходного сигнала, динамический диапазон,

эксплуатационные и др. [2, 13]. ВОГ навигационного класса точности, способные измерять угловые скорости на уровне 10^{-2} – 10^{-3} °/ч, чувствительны к малейшим внешним и внутренним возмущениям и нестабильностям, что приводит к паразитным эффектам, т.е. к снижению точности прибора. Дальнейшему повышению точности ВОГ препятствует сравнительно большой дрейф нуля выходного сигнала, а также нестабильность масштабного коэффициента [1], что увеличивает требования к техническим характеристикам составляющих его элементов, в том числе к ЭСВИОИ [1, 13].

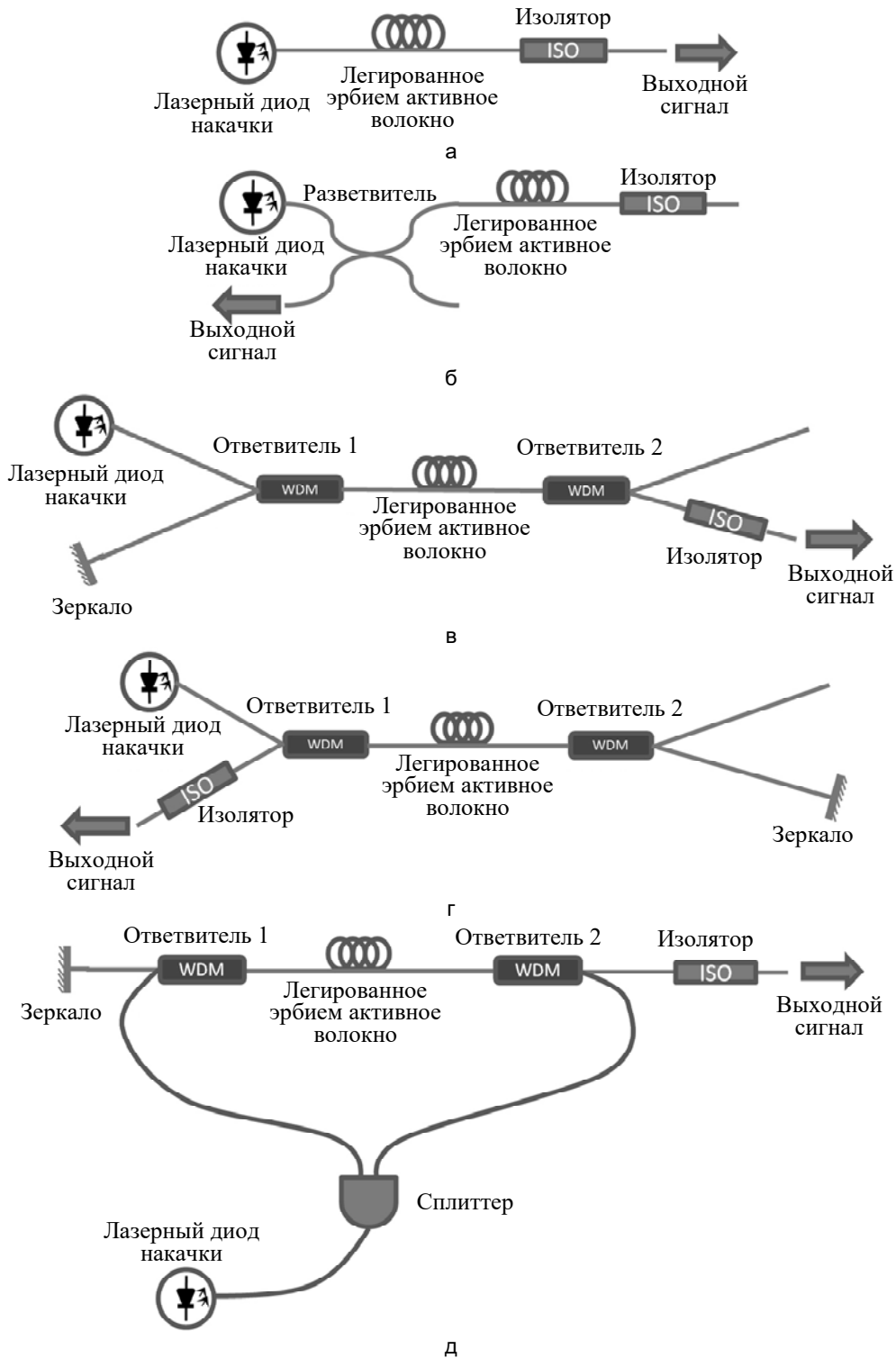


Рис. 2. Основные виды схем накачки активного эрбиевого волокна: однопроходная схема с сонаправленной накачкой (а); однопроходная схема с противонаправленной накачкой (б); двухпроходная схема с сонаправленной накачкой (в); двухпроходная схема с противонаправленной накачкой (г); двухпроходная схема с сонаправленной и противонаправленной накачками (д). WDM (Wavelength Division Multiplexing) – спектральный уплотнитель каналов; ISO (Isolator) – изолятор

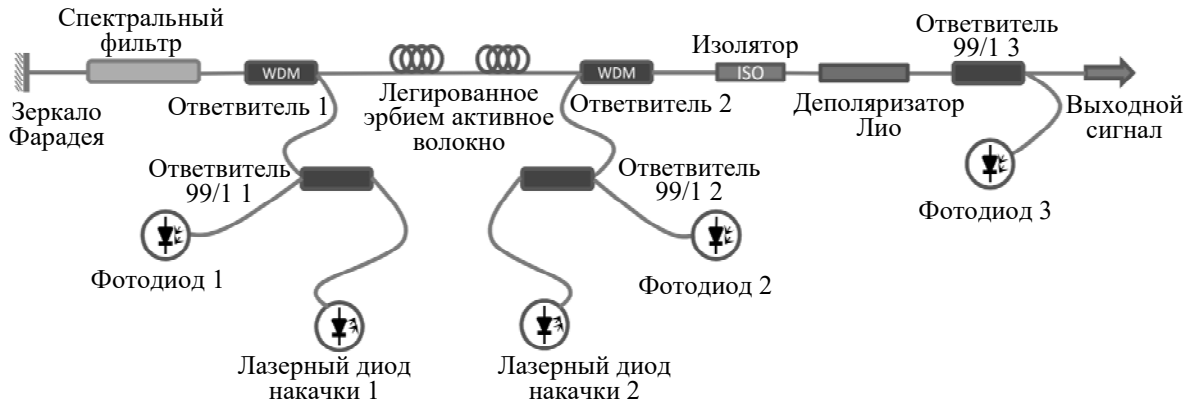


Рис. 3. Обобщенная оптическая схема ЭСВИОИ

На рис. 4 представлена типичная зависимость спектра излучения ЭСВИОИ от температуры. Из рисунка видно, что при изменении температуры происходит перераспределение оптической мощности между различными длинами волн, при этом происходит смещение центральной длины волны источника, что влияет на точность показаний ВОГ.

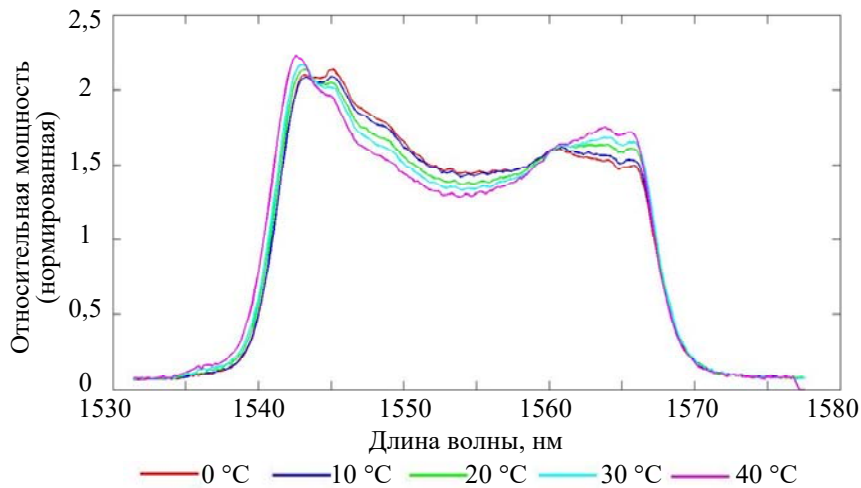


Рис. 4. Типичная зависимость спектра излучения эрбиевого суперлюминесцентного волоконного источника оптического излучения от температуры

Как известно, работа волоконно-оптического гироскопа основана на эффекте Саньяка, заключающемся в том, что при вращении волоконно-оптического интерферометра со скоростью Ω лучи, распространяющиеся в противоположных направлениях, приобретают набег фаз $\Delta\varphi$, пропорциональный действующей угловой скорости [1]:

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

где λ_c – центральная длина волны; c – скорость света; R – радиус катушки; L – длина волокна.

Множитель, стоящий перед Ω , обычно рассматривают как масштабный коэффициент (МК). Из (1) видно, что стабильность центральной длины волны напрямую влияет на значение МК:

$$МК = \frac{4\pi RL}{c \cdot \lambda_c},$$

Для вычисления ошибки МК из-за изменения центральной длины волны продифференцируем (1):

$$d\varphi = \frac{4\pi RL}{c \lambda_c} \frac{d\lambda_c}{\lambda_c} \Omega = \frac{d\lambda_c}{\lambda_c} МК \cdot \Omega, \quad (2)$$

Из (1) и (2) можно получить относительное изменение детектируемой фазы:

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = \frac{d\lambda_c}{\lambda_c}.$$

Сформулируем задачу следующим образом: при каком максимальном изменении центральной длины волны $\Delta\lambda_c$ произойдет отклонение детектируемой скорости не более, чем на $0,01^\circ/\text{ч}$ и $0,001^\circ/\text{ч}$ соответственно, при условии, что реальная скорость вращения, которую должен детектировать ВОГ, равна $\Omega = 1^\circ/\text{с} = 3600^\circ/\text{ч}$.

$$d\Omega \geq \frac{d\lambda_c}{\lambda_c} \Omega_{\text{max}},$$

$$d\lambda_c \geq \frac{d\Omega \cdot \lambda_c}{\Omega_{\max}}$$

$$d\lambda_c \leq \frac{0,01^\circ/\text{ч} \cdot 1554 \text{ нм}}{3600^\circ/\text{ч}}$$

$$d\lambda_c \leq 1,08 \cdot 10^{-4} \text{ нм,}$$

$$d\lambda_c \leq \frac{0,001^\circ/\text{ч} \cdot 1554 \text{ нм}}{3600^\circ/\text{ч}}$$

$$d\lambda_c \leq 4,32 \cdot 10^{-3} \text{ нм,}$$

$$d\lambda_c \leq 4,32 \cdot 10^{-4} \text{ нм.}$$

Таким образом, центральную длину волны необходимо стабилизировать на уровне $d\lambda_c \leq 4,32 \cdot 10^{-3} \text{ нм}$ и $d\lambda_c \leq 4,32 \cdot 10^{-4} \text{ нм}$, что составляет 2,7 ppm (parts per million – частей на миллион) и 0,27 ppm соответственно [14, 15].

Температурная нестабильность ЭСВИОИ

Нестабильность флуктуаций спектра и центральной длины волны, а также выходной мощности генерируемого ЭСВИОИ оптического излучения при работе в широком диапазоне температур напрямую влияет на точность показаний ВОГ. Так, при нагреве лазерных диодов накачки происходит уменьшение их выходной мощности из-за возрастания концентрации термоденерированных свободных носителей в активной области и оптическом волноводе диода. Кроме того, нагрев лазерных диодов приводит к сдвигу длины волны излучения, что приводит к изменению коэффициента поглощения излучения накачки в активном волокне и снижает эффективность накачки, изменяет пространственное распределение температуры в волокне и выходной спектр излучения источника.

Условно методы повышения стабильности ВОИ ЭСВИОИ можно разделить на несколько групп. Одной из наиболее распространенных групп методов является построение системы с обратной связью, стабилизирующей выходную оптическую мощность ЭСВИОИ. Часть выходного излучения с помощью оптического ответвителя направляется на фотодиод. С помощью фотодиода фиксируется фактическая мощность в данный момент времени и сравнивается с заданной электронным блоком ЭСВИОИ на основании ранее снятых температурных зависимостей, а затем принимается решение об увеличении или уменьшении тока накачки лазерных диодов, т.е. о корректировке выходной оптической мощности [16–18].

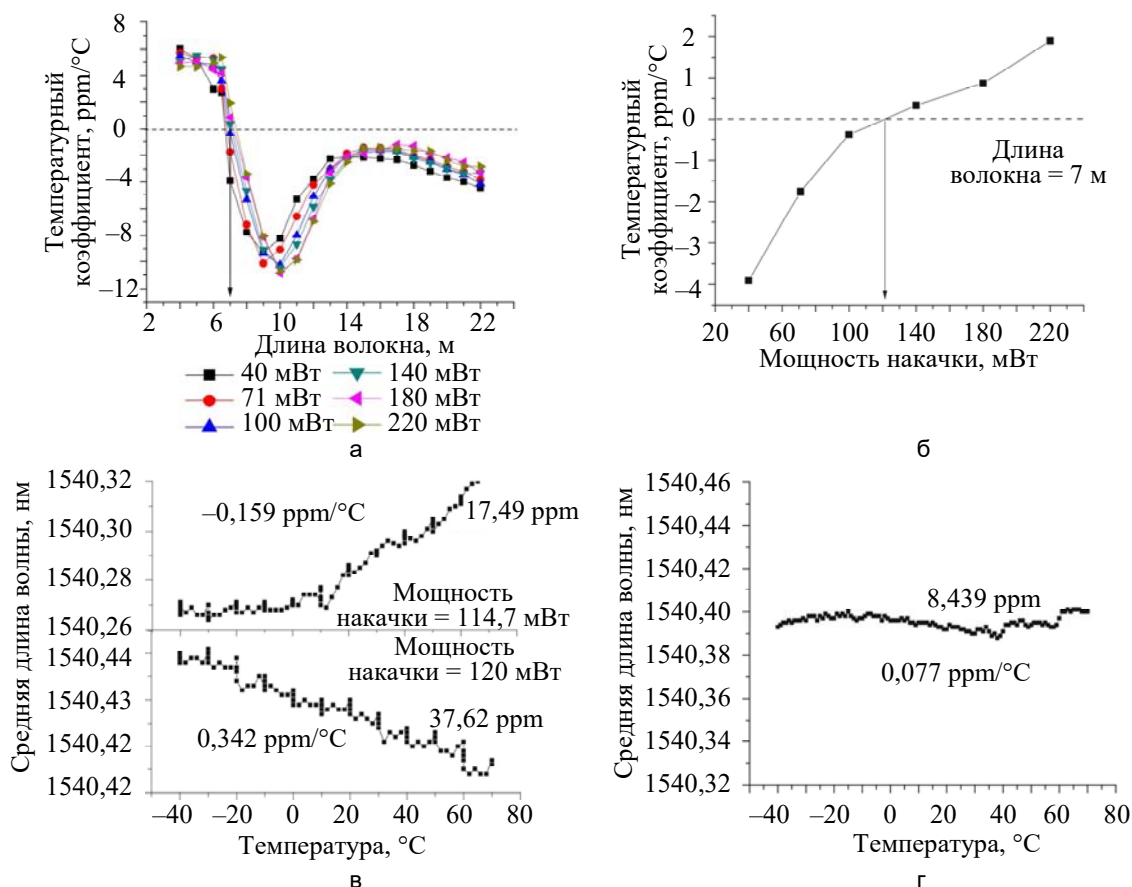


Рис. 5. Выбор длины активного волокна (а); подбор мощности накачки (б); прецизионная подстройка мощности накачки (в); достигнутая зависимость средней длины волны [20] (г)

Вторая группа методов посвящена стабилизации выходного оптического излучения диода накачки. Температурная стабильность средней длины волны излучения лазерного диода накачки обычно составляет около $400 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, а мощности – $0,3 \text{ мВт}/^\circ\text{C}$. Данная проблема решается двумя методами: температурной стабилизацией диодов накачки, а также повышением стабильности резонатора с применением узкополосных решеток Брэгга.

При использовании термостабилизированных диодов накачки на элементах Пельтье общая потребляемая мощность ЭСВИОИ возрастает, что отражается как на габаритных размерах источника, так и на его тепловыделении. Стоит отметить, что электроника ЭСВИОИ, отвечающая за стабилизацию выходной мощности и температуры диодов накачки, также чувствительна к температуре, поэтому при ее проектировании необходимо использовать компоненты с минимальными температурными коэффициентами.

Третья группа методов заключается в подборе оптимальной мощности излучения накачки, а также типа и оптимальной длины активного легированного волокна, при которой коэффициент температурной зависимости центральной длины волны выходного излучения ЭСВИОИ был бы минимален [19–22]. Рассмотрим данный метод на примере (рис. 5). На первом этапе определяется длина активного эрбиевого волокна, при которой температурный коэффициент был бы близок к нулю (рис. 5, а). Следующими шагами являются грубый и прецизионный подбор оптической мощности накачки, при которой температурный коэффициент был бы близок к нулю (рис. 5, б, в). Как видно из рис. 5, г, данный метод позволяет добиться хороших результатов [23].

Использование фотонно-кристаллического волокна, легированного ионами эрбия без схем термостабилизации, позволяет достичь стабильности центральной длины волны на уровне $0,077 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ в широком температурном диапазоне от -40°C до $+70^\circ\text{C}$ [23]. Его особенностью является низкая температурная зависимость. Однако довольно непростой задачей является ввод света в данное волокно без существенных оптических потерь [24].

В некоторых случаях используются специальные легированные фосфатные волокна с большой концентрацией ионов эрбия, уширяющие и сглаживающие спектральную характеристику усиления, в то время как эффективная длина волокна, необходимая для работы ЭСВИОИ, снижается с нескольких десятков метров до нескольких сантиметров, что значительно уменьшает габариты прибора [25].

Степень деполяризации выходного излучения

Оптическая схема ВОГ навигационного класса точности строится на одной поляризационной моде. Оптическое излучение ЭСВИОИ для применения в ВОГ должно обладать минимальной степенью поляризации, в противном случае будут возникать биения интенсивности при воздействиях на подводимое волокно до поляризатора, что, в свою очередь, будет вносить ошибку в показания прибора и, как следствие, снижать точность ВОГ [2].

Для минимизации остаточной поляризации в ЭСВИОИ обычно применяются волоконно-оптические деполяризаторы Лио [26, 27]. Деполяризатор Лио предназначен для выполнения преобразования поляризации спектральных компонент поляризованного широкополосного оптического излучения. Деполяризатор Лио состоит из двух отрезков анизотропного волокна типа PANDA, оси анизотропии в которых развернуты друг относительно друга на 45° , а длины относятся как 1:2, при этом длина единичного участка волокна выбирается такой, чтобы у распространяющегося оптического излучения возникал набег фаз между двумя ортогональными поляризационными компонентами больше длины временной когерентности. Тогда на выходе деполяризатора любая поляризационная компонента преобразуется в две ортогональные компоненты, разнесенные на время, большее времени когерентности входного излучения, следовательно, выходное излучение оказывается «квази»-деполяризованным [28].

Деполяризаторы устанавливаются как на выходе ЭСВИОИ, так и после источника накачки. При установке деполяризатора после диода накачки, при условии, что в схеме все оставшиеся компоненты используются без поляризационной зависимости, оптическое излучение на выходе схемы будет полностью деполяризованным [29]. Для уменьшения поляризационной зависимости двухпроходной схемы в одно из плеч включается зеркало Фарадея [30]. Зеркало Фарадея поворачивает плоскость поляризации отраженного оптического излучения на 90° за счет невзаимного оптического эффекта Фарадея. Таким образом, происходит компенсация фазового набег между двумя ортогональными проекциями вектора поляризации оптического излучения, результатом чего и является уменьшение поляризационной зависимости всей оптической схемы.

Вариантом решения проблемы поляризационной зависимости может являться полная поляризация оптического излучения путем применения в ЭСВИОИ компонентов только с сохранением поляризации. Такой вариант усложняет оптическую схему и повышает стоимость ЭСВИОИ на порядок.

Функция временной когерентности ЭСВИОИ

Среди факторов, ограничивающих кратковременную разрешающую способность ВОГ, наиболее сильное влияние оказывают обратные отражения и рассеяния света в оптических элементах схемы. Для

борьбы с этими паразитными эффектами в ВОГ применяются источники оптического излучения с широким спектром и узкой функцией временной когерентности.

Благодаря использованию ЭСВИОИ в качестве широкополосного источника оптического излучения удастся добиться повышения точности ВОГ. При нулевой разности путей в интерферометре Саньяка наблюдается максимальный интерференционный контраст, но по мере увеличения разности пути контраст снижается. ВОГ работает в пределах нулевой и первой полос интерференционной картины, поэтому уменьшение контраста интерференции минимально и не сказывается на его характеристиках. В то же время для снижения влияния паразитных обратных отражений, обратного рэлеевского рассеяния, изменяющихся во времени тепловых градиентов волокна интерферометра и других, упомянутых ранее, необходимо иметь узкую функцию временной когерентности, которая достигается за счет увеличения ширины спектра, формируемого источником оптического излучения, и приближения его формы к распределению Гаусса. Форма спектра излучения ЭСВИОИ обычно содержит два выраженных пика в районе 1540 нм и 1565 нм (рис. 4), при этом функция временной когерентности является широкой с большими локальными максимумами (рис. 6). На рис. 6 в качестве примера представлен ряд расчетных спектров с одинаковыми центральными длинами волн и мощностью, а также соответствующие им функции временной когерентности. Хочется отметить, что даже локальные максимумы функции временной когерентности, несмотря на малый контраст интерференционной картины под воздействием паразитных эффектов, будут вносить ощутимую ошибку в общий интерференционный сигнал ВОГ.

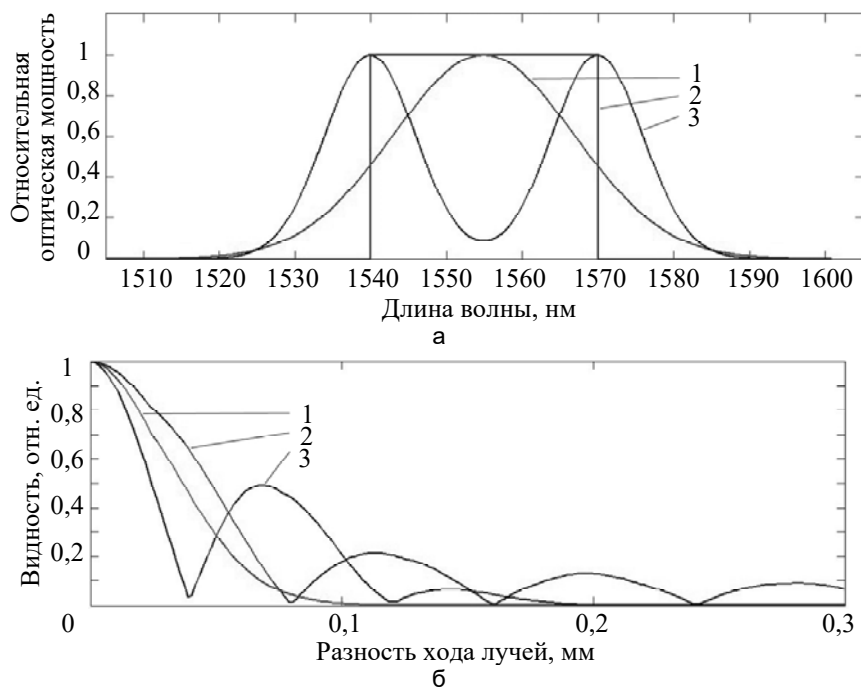


Рис. 6. Спектры оптического излучения (а): 1 – форма распределения Гаусса; 2 – форма меандра; 3 – форма с двумя горбами. Соответствующие спектрам функции временной когерентности (б): 1 – для формы распределения Гаусса; 2 – для формы меандра; 3 – для формы с двумя горбами

Спектр выходного оптического излучения ЭСВИОИ обусловлен спектрами поглощения и люминесценции ионов эрбия в структуре кварцевого стекла. Спектры поглощения и люминесценции зависят от штарковского расщепления уровней Er^{+3} , которое определяется напряженностью поля в месте расположения иона. Вводя в кварцевую структуру дополнительные легирующие примеси, можно изменять электрическое поле и корректировать спектр люминесценции Er^{+3} . В связи с этим для оптимизации спектра выходного оптического излучения в оптическую схему ЭСВИОИ включаются оптические фильтры, а в состав волокна вносятся дополнительные примеси. Оптические фильтры размещаются как на выходе оптической схемы, так и в плече с зеркалом в двухпроходной схеме (рис. 7, а). Преимуществом второго варианта является стабилизация излучаемого спектра без прироста потребляемой мощности всей системой (рис. 7, б, в), а также минимизация элементов в оптической схеме, что увеличивает КПД и надежность ЭСВИОИ, а также снижает его стоимость.

В последнее время фотоиндуцированные решетки Брэгга находят широкое применение в качестве отражателей для волоконных лазеров, компенсаторов дисперсии, чувствительных элементов датчиков. Фильтры, состоящие из их комбинаций, также используются для выравнивания спектра усиления [31–38]. Спектрально селективные фильтры на основе широкополосных решеток Брэгга позволяют добиться необ-

ходимой формы спектра и высокой стабильности центральной длины волны выходного оптического излучения ЭСВИОИ на уровне 2 ppm в температурном диапазоне от 0 °С до 70 °С [33, 39].

В качестве спектрально селективных поглощающих фильтров используются фильтры на основе как световодных, так и объемных элементов [11, 33]. Например, решетчатый фильтр, изготовленный электронной литографией фоторезиста, прижимаемый к сошлифованному с одной стороны волокну D-типа, через иммерсионную среду для создания периодической модуляции показателя преломления внешней среды [40]. Существует также метод выравнивания спектра усиления с помощью фильтра на основе механической решетки, прижимаемый к волокну, для создания периодических микроизгибов и напряжений [41].

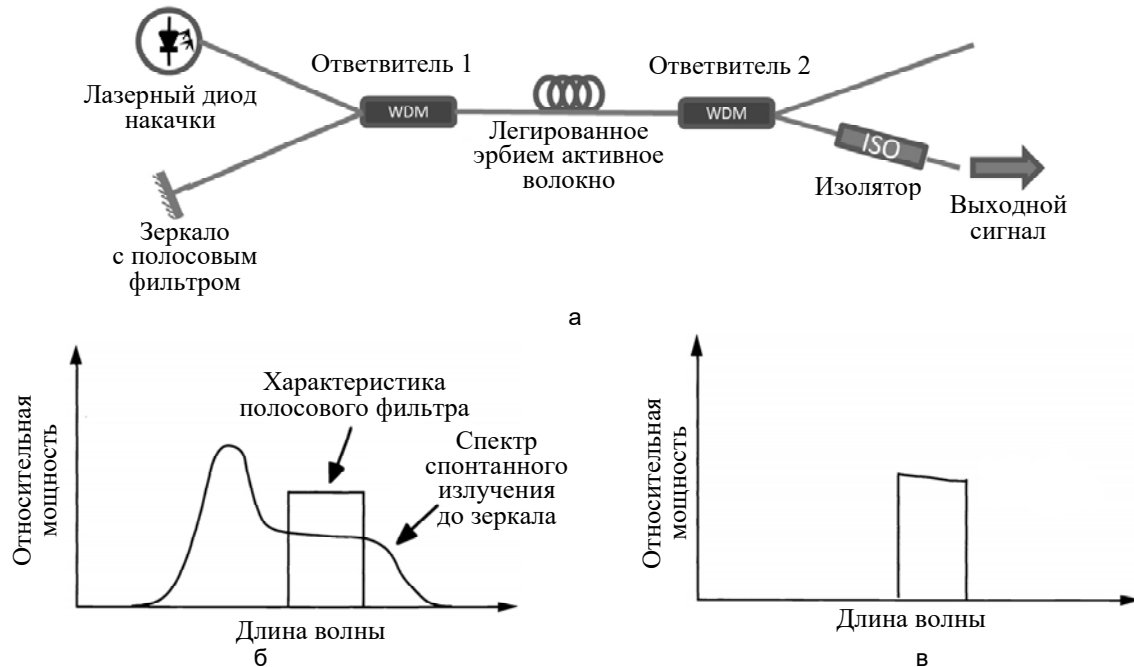


Рис. 7. Двухпроходная оптическая схема эрбиевого суперлюминесцентного волоконного источника оптического излучения с полосовым фильтром (а); спектр спонтанного излучения и характеристика полосового фильтра (б); спектр выходного оптического излучения [28] (в)

Для коррекции ширины и формы спектра, а также увеличения их стабильности в качестве выходного спектрально-селективного оптического фильтра могут быть использованы оптические волокна без инверсии населенности, поглощающие оптическое излучение в определенной спектральной области [19, 42]. Существует также метод с установкой на выход однопроходной, сонаправленной схемы симметричного нелинейного оптического зеркального контура в качестве спектрально-селективного оптического фильтра. В работе [43] подробно описывается такой контур, который состоит из X-оптического разветвителя, одного километра оптического волокна типа SMF28e, скрученного по три витка на метр, и четвертьволновой пластины. Стоит отметить, что оптическое излучение, попадающее в контур, должно обладать максимальной степенью поляризации. Корректировка спектра выходного оптического излучения осуществляется благодаря регулировке мощности излучения накачки. К минусам данного метода можно отнести высокую зависимость передаточной характеристики контура от степени поляризации входного оптического излучения. Популярным методом компенсации наклона усиления является использование оптических фильтров разных типов. Выравнивающий фильтр должен иметь широкую характеристику и небольшое, порядка 3–4 дБ, поглощение [44, 45].

Стоит отметить, что для применения в волоконно-оптических гироскопах ЭСВИОИ рекомендуется строить по двухпроходной обратной схеме, что обусловлено рядом причин. Во-первых, двухпроходные схемы обладают большим значением КПД, чем однопроходные, как следствие, необходимо меньшее количество активного эрбиевого волокна и менее мощный диод накачки для достижения необходимой мощности на рабочей длине волны [4]. Во-вторых, центральная длина волны в двухпроходной схеме сдвинута в область 1555 нм (при рабочей мощности накачки более 40 мВт) против сдвига в однопроходной в область 1535 нм. В-третьих, двухпроходная схема обладает более линейной зависимостью выходной мощности от мощности накачки [46]. Вышеописанные причины являются несомненными преимуществами двухпроходной схемы перед однопроходной при работе ЭСВИОИ в ВОГ. Так, в ряде работ происходит экспериментальное сравнение однопроходной и двухпроходной обратной схемы. Результаты сравнений выражены как в характеристиках самой схемы, в стабильности ее выходной мощности и центральной длины волны, так и в характеристиках ВОГ: дрейфе его выходного сигнала и вариации Аллана. На основании этих данных делается вывод о преимуществе двухпроходной схемы над однопроходной

[36, 46, 47]. Подробно метод вариаций Аллана на примере анализа погрешностей микромеханических гироскопов описан в работе [48]. Эффективным вариантом является построение видоизмененных двухпроходных оптических схем накачки легированного эрбием волокна с применением полосовых фильтров, комбинированных с зеркалом Фарадея [49–51]. Например, применение двухкаскадной схемы источника с использованием для каждого каскада как общего диода накачки, так и разных, с разными длинами волн (980 нм и 1480 нм), позволяет добиться более широкого и гладкого спектра [52, 53].

Существуют схемы с применением спектрального уплотнителя каналов в качестве фильтра [54]. Хорошие результаты достигаются благодаря экспериментированию с применением в качестве выходного фильтра комбинации эрбиевых волокон с различным спектром поглощения [19]. Например, для подавления пика усиления в области 1530–1532 нм может быть использован световод, легированный примесью, вызывающей появление в этой спектральной области избыточных оптических потерь. При этом в диапазоне 1540–1560 нм вносимые потери должны быть минимальными [55].

Все вышеописанные методы позволяют корректировать спектр выходного излучения ЭСВИОИ. Для построения ЭСВИОИ с минимальной по ширине и стабильной во времени функцией временной когерентности можно воспользоваться как одним из упомянутых методов, так и их комбинацией:

- создание периодической структуры для модуляции показателя преломления внешней среды, в том числе фильтры на основе решеток Брэгга;
- эрбиевые волокна без инверсии заселенности;
- включение в двухпроходную оптическую схему оптического зеркального контура;
- выбор более стабильной схемы накачки – двухпроходной;
- применение в качестве фильтра спектрального уплотнителя каналов;
- применение комбинации эрбиевых волокон с различным спектром поглощения.

При выборе метода и соответствующего ему фильтра для коррекции спектра необходимо также учитывать его стабильность в широком диапазоне температур, что является немаловажным критерием для применения в ВОГ.

Активные световоды, применяемые в СВИОИ

В работе [56] показано, что для увеличения эффективности накачки активное волокно, предназначенное для использования в оптических источниках и усилителях, должно иметь повышенную числовую апертуру (NA). Для этого, кроме редкоземельных элементов, сердечник такого волокна дополнительно легируется окислами некоторых веществ. В частности, для эрбиевого волокна такими окислами являются GeO_2 или Al_2O_3 . В соответствии с этим, для ЭСВИОИ и ЭВУОИ выпускаются два типа эрбиевых волокон: первый с присадкой GeO_2 , второй с присадкой Al_2O_3 . В работе [56] приведены основные технические характеристики ЭВУОИ с активными волокнами первого и второго типов. Согласно этим данным, наибольшим усилением на 1 мВт излучения накачки обладают оптические усилители, основанные на первом типе эрбиевого волокна при накачке на длине волны 980 нм. Минимальная пороговая мощность накачки характерна для усилителей со вторым типом эрбиевого волокна при накачке на 1480 нм. Однако следует учесть, что в первом случае числовая апертура волокна равна 0,16, а во втором – 0,12. Если пересчитать минимальную величину мощности накачки для числовой апертуры, равной 0,16 волокна второго типа, то мощность накачки в этом случае будет менее 10,5 мВт. С точки зрения минимальной мощности накачки на соответствующей длине волны эрбиевые волокна характеризуются минимальной мощностью поглощения, при которой создается инверсная среда в сердечнике эрбиевого оптического волокна. В работе [57] описано эрбиевое волокно с минимальной мощностью поглощения накачки 3 мВт на длине волны 1485 нм. Стоит отметить, что максимальное поглощение происходит не на длине волны накачки, а в длинноволновой части рабочего диапазона длин волн. На рис. 8 представлен график зависимости уровня поглощения (в дБ/м) для эрбиевого волокна, из которого видно, что максимум поглощения приходится на часть диапазона в области 1550 нм, поскольку для перехода электронов с основного уровня на нижние подуровни требуется поглощение фотонов с меньшей энергией.

В настоящее время промышленностью производится несколько типов эрбиевых волокон. Для выравнивания частотных характеристик и расширения полосы усиливаемых частот эрбиевых источников излучения и оптических усилителей в сердечник волокна, кроме атомов Ge и Al, вводятся также атомы лантана и других элементов.

Анализ характеристик существующих активных эрбиевых световодов показывает, что современные эрбиевые волокна имеют большую числовую апертуру (в среднем $NA = 0,24$) и очень большие потери на рабочих длинах волн, а также на длине волны накачки (в пассивном режиме). В таких волокнах потери обусловлены, главным образом, поглощением. Так как высокостабильные ЭСВИОИ применяются в основном в интерферометрических оптических датчиках, их оптические схемы построены на основе одномодовых волокон. И поэтому эрбиевое волокно, применяемое в ЭСВИОИ, несмотря на большую числовую апертуру, должно оставаться одномодовым на рабочих длинах волн около 1550 нм [58]. Оно остается практически одномодовым и для длины волны накачки 1480 нм. Другая ситуация возникает в

том случае, когда длина волны накачки составляет 980 нм. Для волны накачки в таком случае эрбиевое волокно не является одномодовым, так как в нем распространяется примерно 6 мод излучения накачки. Это означает, что вследствие интерференции мод поперечное распределение энергии излучения накачки является неравномерным. Это, в свою очередь, приводит к неравномерному уровню населенностей на метастабильном энергетическом уровне, что ведет к неравномерному распределению коэффициента усиления по сечению эрбиевого волокна. Это волокно в реальных устройствах сматывается в бухту диаметром 10–15 см. Согласно теории многомодовых световодов [59, 60], устройство, состоящее из витков волокон, является одним из видов модовых смесителей. Исходя из этого, в результате перемешивания мод в свернутом в бухту эрбиевом волокне распределение энергии по сечению усредняется, делая его равномерным.

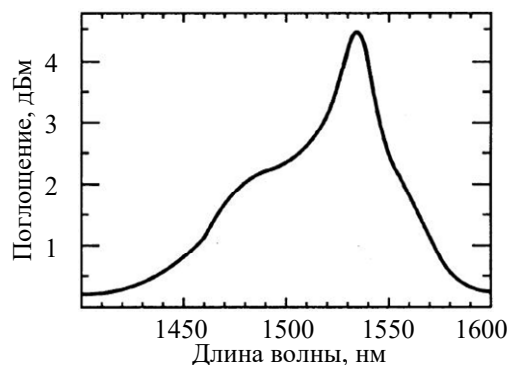


Рис. 8. Спектральная зависимость для первого типа оптического волокна

Заключение

В результате проведенного обзора стало очевидно, что тема повышения стабильности эрбиевых суперлюминисцентных волоконных источников оптического излучения, в особенности для повышения точностных характеристик волоконно-оптических гироскопов, очень актуальна [2, 19, 23, 39, 49, 54]. Были определены основные тенденции развития эрбиевых суперлюминисцентных волоконных источников оптического излучения, как в общем, так и в частности, для применения в волоконно-оптических гироскопах повышенной точности.

Большое количество публикаций посвящено минимизации и стабилизации функции временной когерентности, необходимой для минимизации временного дрейфа выходного сигнала (сдвига нуля) в волоконно-оптических гироскопах. Проанализированы схемы накачки эрбиевых суперлюминисцентных волоконных источников оптического излучения; выявлено, что, по результатам нескольких экспериментальных исследований, а также математического моделирования, описанным в научно-технической литературе, наиболее стабильной схемой с широким спектром является двухпроходная схема со встречной накачкой [2, 10, 46].

Было выявлено, что самым температурно-нестабильным компонентом эрбиевых суперлюминисцентных волоконных источников оптического излучения на сегодняшний день является активное эрбиевое оптическое волокно. Вопрос температурной нестабильности остальных структурных составляющих эрбиевых суперлюминисцентных волоконных источников оптического излучения стоит менее остро, так как модульные лазерные диоды активно развивались в последнее время и выпускаются в настоящий момент со встроенными системами термостабилизации и стабилизации по мощности. В дополнение к этому, в современных блоках контроля и управления эрбиевых суперлюминисцентных волоконных источников оптического излучения, а также, что самое критичное, в оптико-электронном блоке обратной связи по мощности используются элементы с повышенной температурной стабильностью.

Для стабилизации параметров эрбиевых суперлюминисцентных волоконных источников оптического излучения, таких как выходная оптическая мощность и центральная длина волны в широком температурном диапазоне, описано большое количество методов, однако наиболее эффективным и популярным является метод с пошаговым построением оптической схемы и экспериментальным подбором концентрации ионов эрбия в активном волокне, мощности накачки и длины активного волокна [2, 10, 20–23, 46].

References

1. Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. London, Artech House, 1993, 332 p.
2. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope: challenges to become the ultimate rotation-sensing technology. *Optical Fiber Technology*, 2013, vol. 19, no. 6, pp. 828–832. doi: 10.1016/j.yofte.2013.08.007
3. Wysocki P.F., Dignonnet M.J.F., Kim B.Y., Shaw H.J. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, vol. 12, no. 3, pp. 550–567. doi: 10.1109/50.285318

4. Hao Y., Wang R., Li X. Research on fiber amplify sources with double direction pump for fiber optical gyroscopes. *International Workshop on Intelligent Systems and Applications*. Wuhan, China, 2009, art. 5073070. doi: 10.1109/IWISA.2009.5073070
5. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*. Academic Press, 1999, 460 p.
6. Urquhart P. Review of rare earth doped fiber lasers and amplifiers. *IEE Proceedings. Part J. Optoelectronics*, 1988, vol. 135, no. 6, pp. 385–407.
7. *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers, Revised and Expanded*. Ed. M.J.F. Digonnet. NY-Basel, Marcel Dekker Inc., 2001, 798 p.
8. Naji A.W., Hamida B.A., Cheng X.S., Mahdi M.A., Harun S., Khan S., Al-Khateeb W.F., Zaidan A.A., Zaidan B.B., Ahmad H. Review of Erbium-doped fiber amplifier. *International Journal of the Physical Sciences*, 2011, vol. 6, no. 20, pp. 4674–4689.
9. Kurkov A.S., Dianov E.M. Moderate-power cw fibre lasers. *Quantum Electronics*, 2004, vol. 34, no. 10, pp. 881–900.
10. Wysocki P.F., Digonnet M.J.F., Kim B.Y. Wavelength stability of a high-output, broadband, Er-doped superfluorescent fiber source pumped near 980 nm. *Optics Letters*, 1991, vol. 16, no. 12, pp. 961–963. doi: 10.1364/OL.16.000961
11. Dianov E.M., Karpov V.I., Kurkov A.S., Protopopov V.N. Methods for flattening the gain spectrum of erbium fibre amplifiers. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1996, vol. 26, no. 12, pp. 1029–1034.
12. Kurkov A.S., Nanii O.E. Erbium fiber optical amplifiers. *Lightwave Russian Edition*, 2003, vol. 1, pp. 14–19.
13. Pavlath G.A. Fiber optic gyros past, present, and future. *Proc. SPIE*, 2012, vol. 8421, art. 842102. doi: 10.1117/12.966855
14. Sharkov I.A., Rupasov A.V., Strigalev V.E., Volkovskii S.A. Thermal instability influence of the radiation source characteristics on the signal of fiber-optic gyroscope. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no.6, pp. 31–35.
15. Park H.G., Digonnet M. Er-doped superfluorescent fiber source with a 0.5-ppm long-term mean-wavelength stability. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, vol. 21, no. 12, pp. 3427–3433. doi: 10.1109/JLT.2003.822539
16. Park H.G., Digonnet M.J.F., Kino G.S. *Er-doped Superfluorescent Fiber Source with Enhanced Mean Wavelength Stability*. Patent US7269190, 2007.
17. Park T.-S., Choi D.-I., Oh Y.-J. *Gain Control Device and Method for Erbium Doped Fiber Amplifier*. Patent US6762878, 2004.
18. Fidric B.C., Michal R.J., Steele J.R., Goldner E.L., Patterson R.A. *Optical Fiber Amplifier Eled Light Source With a Relative Intensity Noise Reduction System*. Patent US5761225, 1998.
19. Wan H., Zhang D., Sun X. Stabilization of a superfluorescent fiber source with high performance erbium doped fibers. *Optical Fiber Technology*, 2013, vol. 1, no. 3, pp. 264–268. doi: 10.1016/j.yofte.2013.02.006
20. Zatta P.Z., Hall D.C. Ultra-high-stability two-stage superfluorescent fibre sources for fibre optic gyroscopes. *Electronics Letters*, 2002, vol. 38, no. 9, pp. 406–408. doi: 10.1049/el:20020278
21. Hall D.C., Burns W.K., Moeller R.P. High-stability Er³⁺-doped superfluorescent fiber sources. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, vol. 13, no. 7, pp. 1452–1460. doi: 10.1109/50.400711
22. Hall D.C., Burns W.K. Wavelength stability optimization in Er³⁺-doped superfluorescent fiber sources. *Electronics Letters*, 1994, vol. 30, no. 8, pp. 653–654. doi: 10.1049/el:19940430
23. Wu X., Zhang L., Liu C.-X., Ruan S.-C. High-stable, double-pass forward superfluorescent fiber source based on erbium-doped photonic crystal fiber. *Applied Physics B. Laser and Optics*, 2013, vol. 114, no. 3, pp. 433–438. doi: 10.1007/s00340-013-5537-8
24. Yang H., Ruan S., Yu Y., Zhou H. Erbium-doped photonic crystal fiber laser with 49 mW. *Optics Communications*, 2010, vol. 283, no. 16, pp. 3176–3179. doi: 10.1016/j.optcom.2010.04.021
25. Goel N.K., Pickrell G., Stolen R. An optical amplifier having 5 cm long silica-clad erbium doped phosphate glass fiber fabricated by "core-suction" technique. *Optical Fiber Technology*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 325–327. doi: 10.1016/j.yofte.2014.03.006
26. Falquier D.G., Digonnet M.J.F., Shaw H.J. A depolarized Er-doped superfluorescent fiber source with improved long-term polarization stability. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, vol. 13, no. 1, pp. 25–27. doi: 10.1109/68.903209
27. Burns W.K., Kersey A.D. Fiber-optic gyroscopes with depolarized light. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, vol. 10, no. 7, pp. 992–999. doi: 10.1109/50.144925
28. Burns W.K. Degree of polarization in the lyot depolarizer. *Journal of Lightwave Technology*, 1983, vol. 1, no. 3, pp. 475–479.
29. Falquier D.G., Digonnet M.J.F., Shaw H.J. *Polarization and Wavelength Stable Superfluorescent Sources*. Patent US6429965, 2002.

30. Falquier D.G., Digonnet M.J.F., Shaw H.J. A polarization-stable Er-doped superfluorescent fiber source including a faraday rotator mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 11, pp. 1465–1467. doi: 10.1109/68.887672
31. Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Korolev I.G., Dianov E.M. Photoinduced fiber gratings of the refractive index and their application. *Foton-Ekspress*, 2004, no. 6, pp. 163–183.
32. Gaiffe T., Simonpietri P., Morisse J., Cerre N., Taufflieb E., Lefevre H.C. Wavelength stabilization of an erbium-doped-fiber source with a fiber Bragg grating for high-accuracy FOG. *Proceedings of SPIE*, 1996, vol. 2837, pp. 375–380.
33. Vasil'ev S.A., Dianov E.M., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Protopopov V.N. Photoinduced in-fibre refractive-index gratings for core – cladding mode coupling. *Quantum Electron*, 1997, vol. 27, no. 2, pp. 146–149. doi: 10.1070/QE1997v027n02ABEH000893
34. Kashyap R., Wyatt R., McKee P.F. Wavelength flattened saturated erbium amplifier using multiple side-tap Bragg gratings. *Electronics Letters*, 1993, vol. 29, no. 11, pp. 1025–1026.
35. Dianov E.M., Karpov V.I., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Prokhorov A.M., Protopopov V.N., Vasil'ev S.A. Gain spectrum flattening of erbium doped fiber amplifier using long period grating. *Photosensitivity and Quadratic Nonlinearity in Glass Waveguides: Fundamentals and Applications*. Portland, USA, 1995, vol. 22, pp. 9–11.
36. Rao Y.-J., Jones J.D.C., Naruse H., Chen R.I. Erbium-doped superfluorescent fiber source for fiber optic gyroscope. *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4920, pp. 1–4.
37. Wagener J.L., Hodgson C.W., Falquier D.G. *Stable Fiber ASE Sources Incorporating Spectral Filtering*. Patent US5875203, 1999.
38. Medvedkov O.I., Korolev I.G., Vasil'ev S.A. *Zapis' Volokonnykh Breggovskikh Reshetok v Skheme s Interferometrom Lloida i Modelirovanie ikh Spektral'nykh Svoistv: preprint NTsVO IOF RAN* [Recording of fiber Bragg gratings in Lloyd interferometer scheme and their spectral properties modeling: preprint FORC GPI]. Moscow, 2004, no. 6.
39. Ou P., Cao B., Zhang C.X., Li Y., Yang Y.H. Er-doped superfluorescent fibre source with enhanced mean-wavelength stability using chirped fibre grating. *Electronics Letters*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 187–189. doi: 10.1049/el:20082948
40. Wilkinson M., Belbington A., Cassidy S.A., McKee P. D-fibre filter for erbium gain spectrum flattening. *Electron Letters*, 2007, vol. 28, no. 2, pp. 131–132.
41. Tachibana M., Laming R.I., Morkel P.R., Payne D.N. Erbium-doped fiber amplifier with flattened gain spectrum. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, vol. 3, no. 2, pp. 118–120. doi: 10.1109/68.76860
42. Huang W., Wang X., Xu H. Stable L-band superfluorescent fiber source using one pump. *Optical Engineering*, 2009, vol. 48, no. 7, art. 075002. doi: 10.1117/1.3168643
43. Tiana J.J., Yao Y., Suna Y.X., Xub X.C., Zhao X.H., Chen D.Y. Flat broadband erbium doped fiber ASE source based on symmetric nonlinear optical loop mirror. *Laser Physics*, 2010, vol. 20, no. 8, pp. 1760–1766. doi: 10.1134/S1054660X10150223
44. Betts R.A., Frisken S.J., Wong D. Technical digest conference. *Optical Fiber Communication*, 1995, vol. B, p. 80.
45. Inoue K., Kominato T., Toba H. Tunable gain equalization using a Mach-Zehnder optical filter in multistage fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, vol. 3, no. 8, pp. 718–720. doi: 10.1109/68.84463
46. Wang L.A., Chen C.D. Comparison of efficiency and output power of optimal Er-doped superfluorescent fiber sources in different configurations. *Electronics Letters*, 1997, vol. 33, no. 8, pp. 703–704. doi: 10.1049/el:19970437
47. Huang Y.-W., Peng T.-S., Wang L.A., Liu R.-Y. Performance comparison of fiber-optic gyroscopes using single pass backward and double pass backward superfluorescent fiber sources. *Proc. of SPIE*, 2009, vol. 7503, art. 75034H. doi: 10.1117/12.835365
48. Matveev V.V., Pogorelov M.G. Error analysis of micromechanical gyroscopes by Allan variance. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie Nauki*, 2015, no. 3, pp. 123–135.
49. Wang A. High stability Er-doped superfluorescent fiber source improved by incorporating bandpass filter. *Photonics Technology Letters*, 2011, vol. 23, no. 4, pp. 227–229. doi: 10.1109/LPT.2010.2098436
50. Wang H., Wang J. Characteristics analysis of two-stage Erbium-doped superfluorescent fiber source. *Proc. 2012 Int. Symposium on Photonics and Optoelectronics*. Shanghai, China, 2012. doi: 10.1109/SOPO.2012.6270957
51. Wang X. Ultra-high-deficiency L-band erbium-doped superfluorescent fiber source with broadening line width. *Optical Engineering*, 2010, vol. 49, no. 8, art. 085003. doi: 10.1117/1.3481119
52. Ales G., Espindola R.P., Strasser T.A. *Article Comprising a High Power/Broad Spectrum Superfluorescent Fiber Radiation Source*. Patent US 6507429, 2003.

53. Wang H., Li Y.-G., Chen X.-D., Zhang C., Chen S.-P., Lu F.-Y., Lu K.-C. L-band Erbium-doped optimization of double-pass two-directional broadband superfluorescent fiber source. *Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials*, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 1–7.
54. Chang J., Manqing T. Experimental optimization of an erbium-doped super-fluorescent fiber source for fiber optic gyroscopes. *Journal of Semiconductors*, 2011, vol. 32, no. 10, art. 104007. doi: 10.1088/1674-4926/32/10/104007
55. Belov A.V., Devyatykh G.G., Dianov E.M., Guryanov A.N., Gusovskiy D.D., Khopin V.F., Kurkov A.S. Sm³⁺-doped fibre application to spectral filtration in the range 1.53-1.57 μm . *Soviet Lightwave Communications*, 1992, vol. 2, no. 3, pp. 265–268.
56. Desurvire E., Bayart D., Desthieux B., Bigo S. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. NY, John Wiley & Sons, 2002, 816 p.
57. Lebrasseur E., Gao Y., Boulard B., Jacquier B. Amplification in Er³⁺ doped PZG fluoride glass channel waveguides. *ECOC*, 1999, vol. 1, pp. 54–55.
58. Sklyarov O.K. *Volokonno-Opticheskie Seti i Sistemy Svyazi* [Fiber Optic Networks and Communication Systems]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010, 272 p.
59. Lisitsa M.P., Berezhinskii L.I., Valakh M.Ya. *Volokonnaya Optika* [Fiber Optics]. St. Petersburg, Tekhnika, 1968, 280 p.
60. Kielich S. *Molecular Nonlinear Optics*. Warsaw, PWN, 1977.

- | | |
|---------------------------------------|---|
| Алейник Артем Сергеевич | – кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, yartemal@yandex.ru |
| Кикилич Никита Евгеньевич | – инженер, аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kikirlich@mail.ru |
| Козлов Виталий Николаевич | – инженер, аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, zoomtark@gmail.com |
| Власов Александр Андреевич | – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, salusnetklim@yandex.ru |
| Никитенко Александр Николаевич | – инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, a.n.nikitenko.1@gmail.com |
| Artem S. Aleynik | – PhD, Associate Professor, Head of laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, yartemal@yandex.ru |
| Nikita E. Kikirlich | – engineer, postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kikirlich@mail.ru |
| Vitaly N. Kozlov | – engineer, postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kozlov_vitali@hotmail.com |
| Alexander A. Vlasov | – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, salusnetklim@yandex.ru |
| Alexander N. Nikitenko | – engineer-researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a.n.nikitenko.1@gmail.com |



Алейник Артем Сергеевич – доцент, заведующий лабораторией, кандидат технических наук. В 2005 г. работал инженером в ОАО «Гипросвязь СПб» в отделе проектирования линейных сооружений связи. В 2008 г. окончил с отличием Университет ИТМО с присвоением квалификации инженер по специальности «Физика и техника оптической связи», поступил в аспирантуру и в 2012 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование и повышение точностных параметров волоконно-оптических гироскопов». С 2006 по 2010 гг. работал инженером-исследователем в ОАО «НПП Дальняя Связь» в отделе проектирования цифровых и импульсных устройств, а также по совместительству инженером в ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в отделе волоконно-оптической гироскопии и инерциальных систем навигации. С 2011 г. – доцент кафедры световодной фотоники в Университете ИТМО.

Автор более 30 статей, опубликованных в отечественных и международных научных изданиях. Область научных интересов – волоконно-оптические датчики физических величин, электроника и оптоэлектроника, волоконная и интегральная оптика.

Artem S. Aleynik is an Associate professor, a Head of the Programmable Electronics laboratory, PhD. In 2005 he worked at Communication Line Structure Design Department of JSC “Giprosvyaz SPb” in the position of an engineer. He graduated from ITMO University with honors in 2008 with conferred qualification of an engineer in “Physics and Optic Communication Engineering”. He entered a graduate school and successfully presented “Research and improvement of precision characteristics of fiber-optic gyroscopes” PhD thesis in 2012. From 2006 to 2010 he has been working at Digital and Impulse Electronics Department of JSC “RPE Dalnaya Svayz” in the position of the research engineer and worked in part-time position of the engineer at Fiber Optic Gyroscopy Department of JSC “Concern “CSRI “Elektroprigor”. Since 2011 he is an Associate professor of Lightguide Photonics Department of ITMO University. He is the author of more than 30 articles

published in Russian and international publishing houses. His research interests are: fiber-optic sensors of physical quantities, electronics and optoelectronics, fiber-optics and integral optics.



Кикилич Никита Евгеньевич окончил Университет ИТМО в 2014 г. по специальности «Физика и техника оптической связи». В настоящее время – аспирант Университета ИТМО по специальности «Приборы и методы измерения (по видам измерений)». Работает инженером на кафедре световодной фотоники Университета ИТМО. Область научных интересов – квантовая оптика, волоконно-оптические интерферометрические фазовые датчики, приборостроение, электроника и оптоэлектроника.

Nikita E. Kikilich graduated from ITMO University in 2014 in specialty “Physics and Optic Communication Engineering”. Currently he is a postgraduate student of ITMO University in specialty “Measuring Methods and Devices (by measurement categories)” and an engineer of ITMO University Lightguide Photonics Department. His research interests are: quantum optics, fiber-optical interferometric phase sensors, instrumentation, electronics and optoelectronics.



Козлов Виталий Николаевич окончил Университет ИТМО в 2014 г. по специальности «Физика и техника оптической связи». В настоящее время – аспирант Университета ИТМО по специальности «Приборы и методы измерения (по видам измерений)». Работает инженером на кафедре световодной фотоники Университета ИТМО. Область научных интересов – волоконно-оптические гироскопы, фотоника.

Vitaly N. Kozlov graduated from ITMO University in 2014 in specialty “Physics and Optic Communication Engineering”. Currently he is a postgraduate student of ITMO University in specialty “Measuring Methods and Devices (by measurement categories)” and an engineer of ITMO University Lightguide Photonics Department. His research interests are: fiber optic gyroscopes, photonics.



Власов Александр Андреевич окончил бакалавриат Университета ИТМО в 2014 г. по направлению «Телекоммуникации». В настоящее время продолжает обучение в магистратуре по специальности «Оптические системы и сети связи». Работает инженером на кафедре световодной фотоники Университета ИТМО. Область научных интересов – квантовая оптика, волоконно-оптические интерферометрические фазовые датчики.

Alexander A. Vlasov graduated from ITMO University with bachelor degree in “Telecommunications” in 2014. Currently he is a master student in specialty “Optical Telecommunication Systems and Networks” and an engineer of ITMO University Lightguide Photonics Department. His research interests are: quantum optics, fiber-optical interferometric phase sensors.



Никитенко Александр Николаевич получил степень магистра в области телекоммуникаций в Университете ИТМО в 2011 г. С 2012 г. работает на кафедре световодной фотоники Университета ИТМО. Область научных интересов – волоконно-оптические интерференционные датчики, цифровая обработка сигналов, прикладная математика, моделирование, программируемая электроника (FPGA, MCU, SoC).

Alexander N. Nikitenko received his master’s degree in Telecommunications in ITMO University in 2011. Since 2012 he is working at Lightguide Photonics Department of ITMO University. His research subjects include: fiber-optic interferometric sensors, digital signal processing, applied mathematics, modeling, programmable electronics (FPGA, MCU, SoC).