

05

Экспериментальное исследование и моделирование условий генерации лазера с распределенной обратной связью в активном эрбиевом оптическом волокне

© Я.Д. Моор, А.В. Куликов, А.Н. Аржаненкова, К.А. Коннов, Г.П. Мирошниченко

Университет ИТМО,
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: moorID@itmo.ru

Поступила в редакцию 01.11.2025 г.

В окончательной редакции 27.01.2026 г.

Принята к публикации 04.02.2026 г.

Представлены результаты экспериментального исследования и математического моделирования условий генерации волоконного лазера с распределенной обратной связью на основе волоконной брэгговской решетки, индуцированной в активное оптическое волокно, легированное ионами эрбия, длиной 50, 60, 65 и 70 мм. Изучено влияние параметров оптического волокна на стабильность и характеристики лазерной генерации. Показано, что для достижения стабильной одночастотной генерации необходим достаточный параметр усиления активной среды, что подтверждено экспериментами с оптическими волокнами FiberCore I-25, I-12 и M-12. Экспериментально обнаружено и объяснено с помощью разработанной математической модели расщепление спектра генерации при длине волоконной брэгговской решетки 70 мм. Моделирование, основанное на системе уравнений взаимодействующих мод с учетом спонтанного шума, продемонстрировало, что введение малого чирпирования ($\xi = 4.3 \cdot 10^{-3}$ nm/cm) в структуру волоконной брэгговской решетки стабилизирует длину волны пика усиленного спонтанного излучения — начального этапа лазерной генерации, аналогично использованию π -фазового сдвига. Результаты работы важны для разработки высокостабильных одночастотных лазеров с распределенной обратной связью, применяемых в высокоточных сенсорных системах и оптической связи.

Ключевые слова: лазер с распределенной обратной связью (РОС-лазер), волоконная брэгговская решетка, активное оптическое волокно, лазерная генерация, метод фазовой маски с трансляцией лазерного пучка, математическое моделирование усиленного спонтанного излучения.

DOI: 10.61011/OS.2026.03.62774.8736-25

Введение

Для высокочастотных измерительных систем обнаружения вибрационных воздействий и акустических сигналов, которые находят применение в морской и наземной сейсморазведке, а также мониторинге месторождений полезных ископаемых, может быть актуально применение одночастотных волоконных лазеров, в излучении которых присутствует только одна продольная мода [1]. Узкая линия генерации и низкий уровень фазовых шумов волоконного квазимонохроматического источника являются привлекательными для создания датчиков физических величин. Этими свойствами обладают лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [2].

Волоконные РОС-лазеры получили широкое распространение в оптических линиях связи и сенсорных системах из-за своей компактности с точки зрения компоновки в конечное изделие [3,4]. Резонатор таких лазеров состоит из ВБР, как правило, с π -фазовым сдвигом, индуцированным непосредственно в активное оптическое волокно, легированное редкоземельными элементами (Er, Yb, Tm, Ho) [5]. В отличие от волоконного лазера с распределенным брэгговским отражателем, состояще-

го из двух пассивных ВБР с участком активного волокна между ними, предложенный в настоящей работе процесс изготовления РОС-лазера является более технологичным, поскольку не требует внесения дополнительного π -фазового сдвига в ВБР, как в работе [5], и соединения различных типов волокон, как в случае с двумя пассивными ВБР. При этом для создания РОС-лазера необходимо выбрать параметры оптического волокна (ОВ) таким образом, чтобы обеспечить стабильную лазерную генерацию активного оптического волокна, что и является целью настоящей работы.

Методика эксперимента и анализ экспериментальных данных

Для создания лазера с распределенной обратной связью в ОВ FiberCore I-25(980/125) [6] (параметры ОВ: длина волны накачки 980 nm, числовая апертура 0.23–0.26, поглощение на длине волны 1531 nm 35–45 dB/m) были индуцированы ВБР с длинами 50, 60, 65 и 70 mm методом фазовой маски с применением Krf-эксимерного лазера Coherent COMPEXPro 102F (центральная длина волны 248 nm), зеркала с интер-

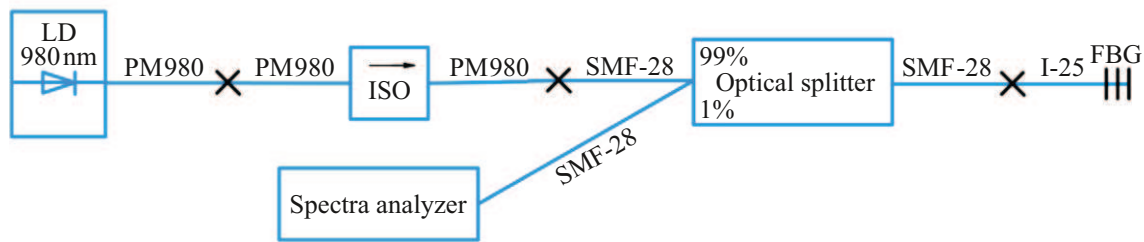


Рис. 1. Волоконно-оптическая схема генерации излучения лазера с распределенной обратной связью на основе единичной ВБР с постоянным периодом модуляции показателя преломления.

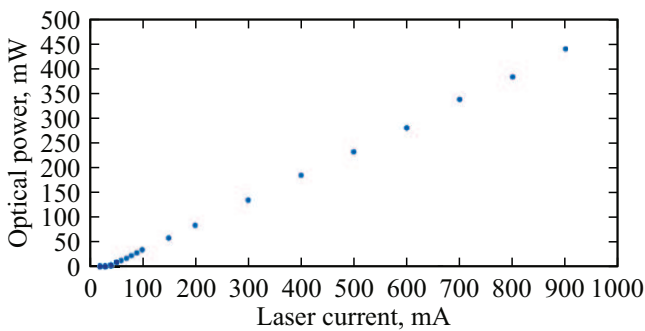


Рис. 2. Ватт-амперная характеристика диода накачки Laser Enterprise II-VI UM96Z460-76, полученная экспериментальным путем.

ференционным покрытием на 248 nm, высокоточного линейного транслятора с ходом 100 mm, фазовой маски (ФМ) Ibsen Photonics, оптимизированной для ± 1 порядка дифракции (параметры ФМ: период 1071.5 nm, размер дифракционной решетки 70×10 mm). Лазерный пучок перемещался вдоль неподвижной ФМ и ОВ, индуцируя ВБР в оптическое волокно длиной более, чем геометрический размер пучка (20×8 mm). Данная технология записи ранее была представлена в работе [7] и позволила индуцировать ВБР длиной до 70 mm в ОВ, легированное ионами эрбия с шириной спектра отражения на полувысоте порядка 40–50 nm и коэффициентом отражения более 99 %.

Для генерации оптического излучения в сформированном РОС-лазере на основе ВБР применялась волоконно-оптическая схема, представленная на рис. 1. Излучение от лазерного диода накачки (Laser Enterprise II-VI UM96Z460-76) с длиной волны 976 nm (ЛД) (предварительные измерения для определения ватт-амперной характеристики представлены на рис. 2) через волоконно-оптический изолятор и оптический ответвитель попадало на ВБР с постоянным периодом модуляции показателя преломления. Излучение, генерируемое РОС-лазером на основе ВБР, через оптический ответвитель направлялось на анализатор оптического излучения (Yokogawa AQ6370C).

Исследование зависимости центральной длины волны генерации РОС-лазера от мощности излучения лазерно-

го диода, подробно исследованное ранее в работе [8], показало, что ширина спектра лазерной генерации РОС-лазера на уровне 3 dB значительно уже, чем ширина спектра данной ВБР (рис. 3). Поэтому применение высокопроизводительных волоконных лазеров одночастотного типа на основе ВБР может значительно увеличить точность детектирования фазового сдвига.

На рис. 3 представлены спектральное распределение усиленного спонтанного излучения (УСИ) волоконного РОС-лазера и спектр отражения ВБР, полученные на основе математического расчета (описание модели будет описано далее), для ВБР длиной 65 mm, с независимым от длины волны параметром усиления $\kappa = 1.5 \cdot 10^{-4}$ db/ μ m, для глубины модуляции эффективного показателя преломления $\Delta n_{ef} = 0.78 \cdot 10^{-4}$, резонансной длины волны $\lambda_{res} = 1.5515 \mu$ m, $n_{ef} = 1.45$ — эффективного модового показателя преломления, параметр аподизации $\gamma = 0.45$, параметр chirпирования $\xi = 4.3 \cdot 10^{-3}$ nm/cm. Расчет выполнен для ВБР, которая разделена на $K = 100$ сегментов случайной длины, модули спонтанного шума выбраны случайным образом по равномерному распределению в интервале от 0 до 0.03 произвольных единиц, фазы спонтанного шума выбраны

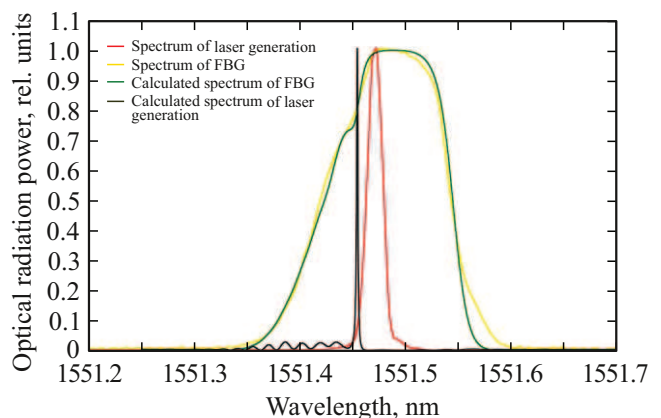


Рис. 3. Измеренные спектры отражения ВБР (желтый), генерации РОС-лазера на основе ВБР длиной 65 mm при токе накачки 600 mA (красный) и математически рассчитанные спектры отражения ВБР (зеленый) и спектрального распределения усиленного спонтанного излучения волоконного РОС-лазера (черный).

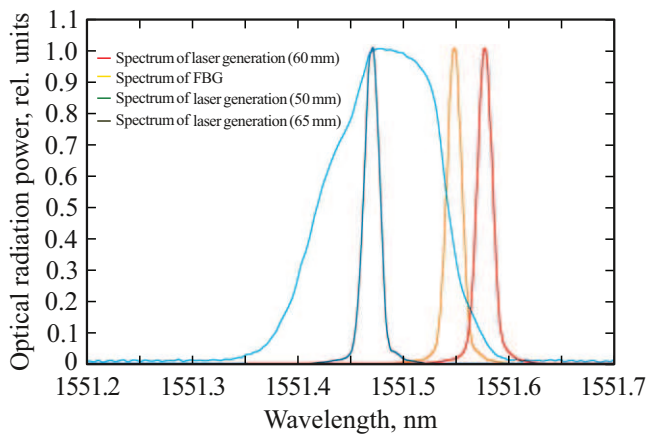


Рис. 4. Спектры излучения РОС-лазера на основе ВБР длиной 50 (красный), 60 (оранжевый) и 65 mm (синий) при токе накачке 600 мА, нормированные на максимальное значение мощности излучения. Голубая линия — экспериментальный спектр отражения ВБР длиной 65 mm.

по равномерному распределению в интервале от 0 до 2π случайным образом. Амплитуды и фазы спонтанного шума считаем независимыми от длины волны.

В спектре экспериментального исследования генерации виден рассчитанный пик спектрального распределения усиленного спонтанного излучения волоконного РОС-лазера (в относительных единицах), ширина спектра усиления порядка 5 nm. Интенсивность зависит от реализации спонтанного шума. На длинах волн в коротковолновой области от рассчитанного пика спектрального распределения усиленного спонтанного излучения волоконного РОС-лазера наблюдается изменение интенсивности спектра УСИ, связанное с усилением равномерного по длине волны шума.

На рис. 3 представлены нормированные на максимальное значение спектрального распределения усиленного спонтанного излучения волоконного РОС-лазера, рассчитанные согласно представленной ниже модели, в линейном приближении, когда коэффициент усиления не зависит от интенсивности УСИ (небольшое превышение порога генерации). Это начальный этап генерации РОС-лазера, в котором за счет селективных свойств ВБР начинают формироваться моды генерации на участках спектра, расположенных на границах спектра отражения ВБР, где обеспечиваются оптимальные условия для обратной связи.

Это неочевидное свойство ВБР, взаимодействующей со спонтанным шумом, поскольку ВБР выполняет две функции, свойственные резонатору: создает распределенную обратную связь, удлиняющую пробег фотонов в активной среде, и является селективным элементом, отбирающим волны определенных длин волн, из которых далее формируются моды генерации РОС-лазера.

Отметим, что спектры отражения ВБР и значения спектрального распределения усиленного спонтанного излучения волоконного РОС-лазера рассчитаны для

ВБР с добавлением малого коэффициента chirпирования $\xi = 4.3 \cdot 10^{-3}$ nm/cm. Как показывает расчет, местоположение пика по длине волны УСИ не зависит от реализации спонтанного шума. В работах [3–5] отмечено, что стабилизация длины волны лазерной генерации возможна при введении π -сдвига фазы в середине ВБР. Наши расчеты продемонстрировали, что введение эффекта chirпирования также стабилизирует длину волны лазерной генерации.

Стоит отметить, что экспериментальный спектр генерации РОС-лазера (рис. 3) шире расчетного значения спектрального распределения усиленного спонтанного излучения волоконного РОС-лазера. Это ключевое расхождение напрямую связано с упрощениями, заложенными в математическую модель. В нашем расчете мы сознательно не учитывали нелинейные эффекты (в первую очередь насыщение коэффициента усиления интенсивностью УСИ), которые неизбежно возникают в реальном эксперименте при достижении и превышении пороговых значений интенсивности. Именно эффект насыщения приводит к уширению генерируемого спектра и его преобразованию.

По результатам исследования при длине ВБР 70 mm при токе накачки 600 мА наблюдалось расщепление спектра (рис. 5), при этом для ВБР длиной 50, 60 и 65 mm расщепление спектра лазерной генерации не наблюдалось (рис. 4).

Данный эксперимент (рис. 4) проводился с ВБР длиной 65 mm, длина которой уменьшалась за счет скола ВБР. Свободный конец помещался в иммерсионный гель для устранения обратных отражений. По мере уменьшения длины спектр лазерной генерации сместился в длинноволновую область, что, предположительно, связано с тепловыми эффектами, возникающими из-за длительного времени проведения эксперимента.

Эксперимент для ВБР длиной 70 mm выявил расщепление спектра лазерной генерации при токах накачки от 600 до 900 мА (рис. 5).

Наблюдаемый эффект расщепления спектра виден в расчетах по разработанной математической модели (рис. 6). Пики спектрального распределения усиленного спонтанного излучения волоконного РОС-лазера формируются на границах спектра отражения ВБР, в центральной области спектра образуется зона, в которой отсутствует лазерная генерация (излучение захвачено ВБР). В областях спектра за пределами спектра отражения ВБР, где обратная связь отсутствует, усиление спонтанного излучения отсутствует.

На рис. 6 показан расчет спектрального распределения усиленного спонтанного излучения волоконного РОС-лазера на основе ВБР (относительные величины) для ВБР с нулевым эффектом chirпирования. Расчет выполнен для параметров $\kappa = 1.5 \cdot 10^{-4}$ dB/ μ m, $\Delta n_{ef} = 0.65 \cdot 10^{-4}$, $\xi = 0$, $\gamma = 0.45$, $\lambda_{res} = 1.55158 \mu$ m, $n_{ef} = 1.45$. В этом случае возможен спектр с одним или с двумя пиками; это означает, что длина волны

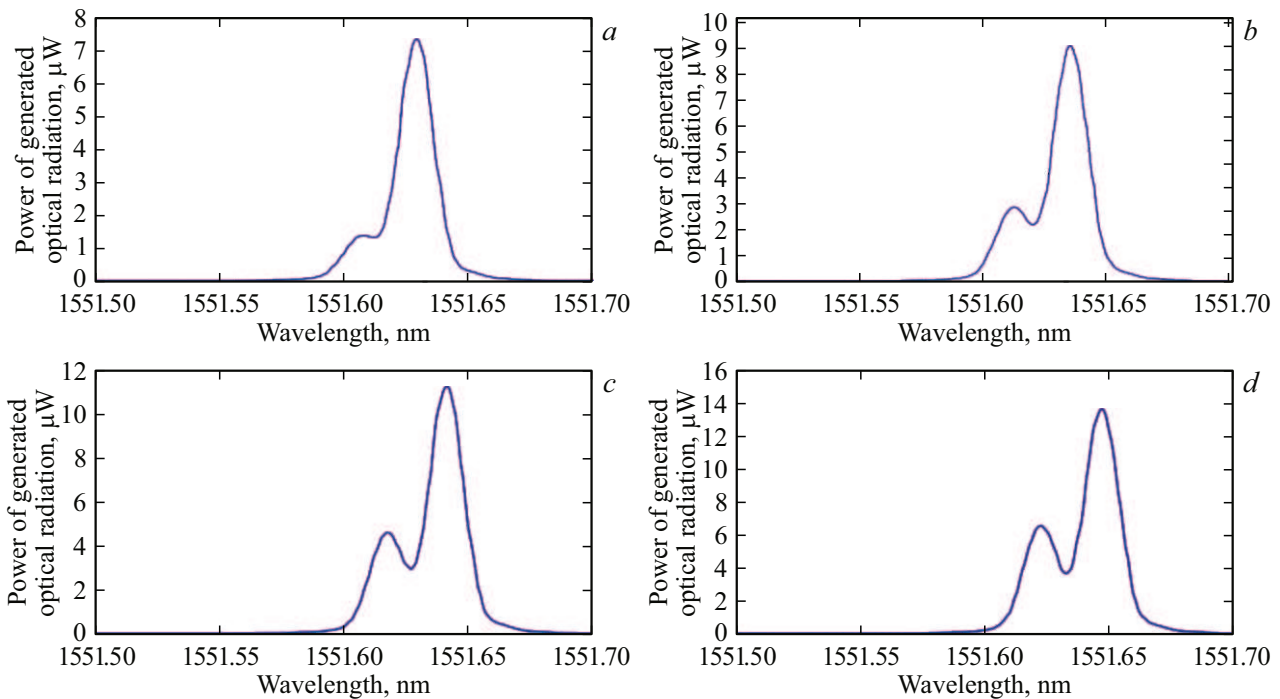


Рис. 5. Спектры излучения лазера с распределенной обратной связью на основе ВБР с длиной 70 мм при токе накачки от 600 до 900 мА, где *a* — 600 мА, *b* — 700 мА, *c* — 800 мА, *d* — 900 мА.

лазерной генерации неустойчива. Критическим параметром появления лазерной генерации РОС-лазера является параметр усиления (разность коэффициента усиления и поглощения для заданного участка оптического волокна) активного ОВ. По результатам исследования было установлено, что при одинаковых параметрах записи ВБР в активное ОВ, легированное ионами эрбия, FiberCore I-25(980/125) [6] генерация лазерного излучения наблюдается, а в ОВ FiberCore I-12(980/125) [9] и FiberCore M-12(980/125) [10] лазерной генерации нет. Параметр усиления на длине волны брэгговского резонанса 1551.5 нм был рассчитан в специализированной среде производства FiberCore GainMaster и составил для FiberCore I-25 $k = 0.238 \cdot 10^{-4}$ дБ/μм, для FiberCore I-12 $k = 0.110 \cdot 10^{-4}$ дБ/μм, для FiberCore M-12 $k = 0.138 \cdot 10^{-4}$ дБ/μм. Таким образом, для эффективной генерации лазерного излучения РОС-лазера на основе ВБР необходимо учитывать параметр усиления оптического волокна.

Моделирование спектральной интенсивности усиленного спонтанного излучения для коэффициента усиления, независимого от интенсивности. Система уравнений и ее решение

При создании модели генерации РОС-лазера необходимо учесть взаимодействие встречных мод на ВБР, коэффициент усиления и затравочный спонтанный шум.

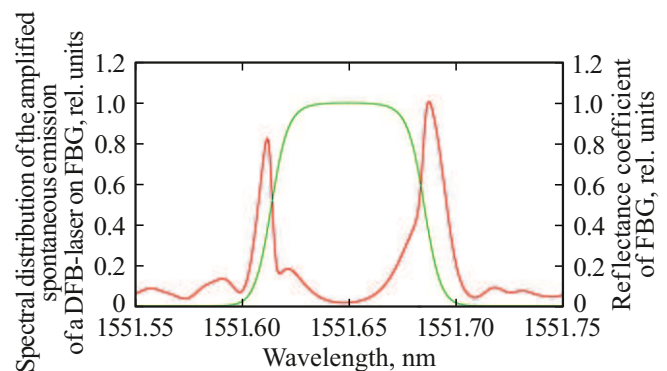


Рис. 6. Рассчитанное спектральное распределение коэффициента отражения ВБР длиной 65 мм (зеленый) и полученное в модели спектральное распределение усиленного спонтанного излучения волоконного РОС-лазера на ее основе (красный).

Предлагаемая модель исследует усиление хаотического спонтанного излучения под действием инвертированной среды и селективной ВБР в приближении постоянного и не зависящего от длины волны коэффициента усиления. Электрическое поле двух волноводных встречно направленных мод в ВБР (в скалярном одномодовом приближении) запишем в виде

$$E(\rho, \varphi, z, t) = a(z)F_a(\rho, \varphi) \exp(i(\omega t - \beta z)) + b(z)F_b(\rho, \varphi) \exp(i(\omega t + \beta z)), \quad (1)$$

где $F_a(\rho, \varphi)$, $F_b(\rho, \varphi)$ — прямая и обратная поперечные основные моды идеального ОВ; ω, β — частота и константа распространения встречно направленных мод в ВБР; z — продольная координата; $a(z)$, $b(z)$ — амплитуды прямой и обратной распространяющихся мод, зависящие от продольной координаты z ; ρ, φ — поперечные цилиндрические координаты.

Подставим уравнение (1) в волновое уравнение, получаем систему дифференциальных уравнений Гельмгольца для амплитуд $a(z)$, $b(z)$, в приближении медленных огибающих волн, по аналогии с работами [11–13],

$$\begin{cases} \frac{da(z)}{dz} = \left(-i \frac{2\pi\Delta n_{\text{ef}}}{\lambda} A p(z) + \kappa\right) a(z) - i \frac{\pi\Delta n_{\text{ef}}}{\lambda} A p(z) \\ \quad \times \exp\left(i(\Delta\beta(\lambda)z - 2\pi\xi\left(\frac{z}{\Lambda}\right)^2)\right) b(z), \\ \frac{db(z)}{dz} = i \frac{\pi\Delta n_{\text{ef}}}{\lambda} A p(z) \exp\left(-i(\Delta\beta(\lambda)z - 2\pi\xi\left(\frac{z}{\Lambda}\right)^2)\right) \\ \quad \times a(z) + \left(i \frac{2\pi\Delta n_{\text{ef}}}{\lambda} A p(z) - \kappa\right) b(z), \end{cases} \quad (2)$$

где $a(z)$ и $b(z)$ описывают амплитуды двух встречных (прямую и встречную) мод в волноводе, λ — длина волны распространяющегося излучения, Δn_{ef} — глубина модуляции эффективного показателя преломления сердцевины волокна, $A p(z) = \exp\left(-\left(\frac{z-L/2}{\gamma L/2}\right)^2\right)$ — функция аподизации, κ — параметр усиления (учитывающий усиления и поглощение оптического волокна), $\Delta\beta(\lambda) = (4\pi n_{\text{ef}}/\lambda - 2\pi/\Lambda)$ — фактор фазового синхронизма, $\Lambda = \lambda_{\text{res}}/2 \cdot n_{\text{ef}}$ — период ВБР, n_{ef} — эффективный модовый показатель преломления, λ_{res} — резонансная длина волны ВБР, ξ — параметр chirпирования, γ — параметр гауссовой аподизации.

Решение уравнения (2) выполняется с помощью матрицы развития $\hat{M}(z)$ по методу Коши по начальным данным $a(0)$, $b(0)$, уравнение (3):

$$\begin{pmatrix} a(z) \\ b(z) \end{pmatrix} = \hat{M}(z) \begin{pmatrix} a(0) \\ b(0) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где начало ВБР расположено в точке $z = 0$.

Матрицу развития находим с помощью численного решения системы уравнений (2) методом Рунге-Кутты второго порядка. В моделируемом РОС-лазере отсутствует обычный зеркальный резонатор. Необходимая для генерации распределенная обратная связь в нашем случае возникает за счет многократных переотражений волн на модуляции показателя преломления ВБР. Условия синхронизации зависят от длины волны. Для появления лазерной генерации в полуклассическом описании необходим затравочный спонтанный шум. Предложим модель введения случайного спонтанного шума в уравнения (2). Разобьем ВБР на K сегментов с номером $1 \leq k \leq K$. Обозначим начальную координату k -ого сегмента через z_{k-1} , конечную координату через z_k , зададим в каждой точке z_0, z_1, \dots, z_k два случайных, равномерно распределенных по модулю и фазе, комплексных числа $\varepsilon_k^a = r_k^a \cdot \exp(i\varphi_k^a)$, $\varepsilon_k^b = r_k^b \cdot \exp(i\varphi_k^b)$, имеющих смысл случайных амплитуд прямой и обратной волны спонтанного шума. Обозначим ε_0^a — падающую спонтанную

волну в начальной точке ВБР, $b(z_0)$ — амплитуду отраженной волны ВБР в начальной точке отсчета ВБР. Тогда, согласно уравнению (3), решение уравнения (2) для определения амплитуд волн после первого сегмента запишутся в виде:

$$\begin{pmatrix} a(z_1) \\ b(z_1) \end{pmatrix} = \hat{M}(z_1) \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_0^a \\ b(z_0) \end{pmatrix}.$$

Здесь и далее матрицы развития k -ого сегмента обозначаются $\hat{M}(z_k)$. В точке z_1 к амплитудам $\begin{pmatrix} a(z_1) \\ b(z_1) \end{pmatrix}$ добавим амплитуды спонтанного шума $\begin{pmatrix} \varepsilon_1^a \\ \varepsilon_1^b \end{pmatrix}$. Тогда поле на выходе второго сегмента получаем в виде:

$$\begin{pmatrix} a(z_2) \\ b(z_2) \end{pmatrix} = \hat{M}(z_2)\hat{M}(z_1) \begin{pmatrix} \varepsilon_0^a \\ b(z_0) \end{pmatrix} + \hat{M}(z_2) \begin{pmatrix} \varepsilon_1^a \\ \varepsilon_1^b \end{pmatrix}.$$

Далее следует продолжить по аналогии до последнего сегмента ВБР. Введем последовательность матриц $\hat{W}(q)$ $q = 0, 1, \dots, K-1$ по формуле

$$\hat{W}(q) = \prod_{k=0}^{K-1-q} \hat{M}(z_{K-k}). \quad (4)$$

С конечного сегмента отсчета на ВБР падает амплитуда спонтанного шума ε_K^b , в результате следует учесть, что

$$b(z_K) = \varepsilon_K^b. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) получаем амплитуду волны УСИ $a(z_K)$, распространяющейся из начальной до конечной точки решетки и амплитуду волны УСИ $b(z_0)$, распространяющейся от конечной точки ВБР в сторону начальной точки

$$\begin{cases} b(z_0) = \frac{\varepsilon_K^b - \sum_{q=1}^{K-1} (\hat{W}(q)_{1,0} \varepsilon_q^a + \hat{W}(q)_{1,1} \varepsilon_q^b) - \hat{W}(0)_{1,0} \varepsilon_0^a}{\hat{W}(0)_{1,1}}, \\ a(z_K) = \sum_{q=1}^{K-1} (\hat{W}(q)_{0,0} \varepsilon_q^a + \hat{W}(q)_{0,1} \varepsilon_q^b) + \hat{W}(0)_{0,0} \varepsilon_0^a + \hat{W}(0)_{0,1} b(z_0). \end{cases}$$

Спектральное распределение усиленного спонтанного излучения волоконного РОС-лазера на основе ВБР, исходящее из конечной точки ВБР, определяется по формуле: $I_a(\lambda) = |a(z_K)|^2$, спектральное распределение УСИ, исходящее из начальной точки ВБР, определяется по формуле: $I_b(\lambda) = |b(z_0)|^2$. В силу линейности задачи расчет выполняется для каждой длины волны независимо, модули и фазы шума выбираются случайно. Для дальнейшего анализа результатов будем рассматривать УСИ, выходящее из начальной точки ВБР. Интенсивность излучения зависит от реализации спонтанного шума и параметра усиления, поэтому результат был нормирован на максимальное значение и приведен в относительных единицах. Это сделано для качественного сравнения спектральной формы в рамках данной линейной модели, где абсолютные значения интенсивности не

несут фундаментального физического смысла, а важна форма и положение спектральных пиков.

В заключение отметим, что принятая в работе математическая модель генерации лазера с распределенной обратной связью линейна по полю и использует не зависящий от времени и поля коэффициент усиления. Предполагается, что такая математическая модель может описать спектральную интенсивность усиленного спонтанного излучения, момент появления лазерной генерации, когда инверсия заселенностей уровней эрбия не начинает истощаться от интенсивности УСИ. Расчеты показывают, что аподизированная и чирпированная волоконная брэгговская решетка, записанная в активное оптическое волокно, легированное ионами эрбия, играет роль селективного элемента, организуя узко-спектральные моды излучения из спонтанного шума. Волны спектрального распределения усиленного спонтанного излучения переотражаются на изменении модуляции показателя преломления ВБР, что приводит к увеличению длины пробега в области с инверсией. Спектр мод спектрального распределения УСИ оказывается узким и концентрируется в областях на краях спектра отражения ВБР. На длинах волн вблизи центральной длины волны брэгговского резонанса ВБР образуется запрещенная для генерации зона. В коротковолновой и длинноволновой областях отражения ВБР генерация не возникает. Для того, чтобы описать нелинейный этап генерации РОС-лазера (после достижения порогового значения интенсивности и установления лазерного режима генерации), необходимо, как известно, решить связанную систему уравнений вещества и поля в присутствии ВБР, как своеобразного резонатора с учетом насыщения инверсии населенности. В настоящей работе эта сложная задача не ставилась. Можно предположить, что некоторое уширение спектра генерации мод связано с эффектом насыщения инверсии. Очевидно, что наша упрощенная модель может претендовать только на качественное сравнение с экспериментальными данными.

Выводы

Представленная нами модель является эффективным инструментом для качественного объяснения и прогнозирования длины волны, на которой наступает лазерная генерация в РОС-лазере на основе ВБР, индуцированной в активное ОВ. Она позволяет определить области спектра отражения, в которых генерация отсутствует и длины волн, на которых лазерная генерация возникает.

Для изготовления лазера с распределенной обратной связью на основе активного ОВ, легированного ионами эрбия, с индуцированной волоконной брэгговской решеткой с постоянным периодом модуляции показателя преломления длиной более 40 нм необходимо провести расчеты параметра усиления ОВ, чтобы определить возможность появления лазерной генерации.

Для эффективной реализации лазера с распределенной обратной связью важным является выбор ОВ с

соответствующим параметром усиления. Результаты экспериментальной работы и компьютерного моделирования подтвердили, что при использовании ОВ с параметром усиления более $k = 0.2 \cdot 10^{-4} \text{ dB}/\mu\text{m}$ позволит получить стабильную лазерную генерацию. В частности, использование волокна FiberCore I-25 с параметром усиления $k = 0.238 \cdot 10^{-4} \text{ dB}/\mu\text{m}$ и длиной ВБР от 45 до 65 мм продемонстрировало возможность достижения стабильной лазерной генерации, а экспериментальные работы с волокном FiberCore I-12 (параметр усиления $k = 0.110 \cdot 10^{-4} \text{ dB}/\mu\text{m}$) и FiberCore M-12 ($k = 0.138 \cdot 10^{-4} \text{ dB}/\mu\text{m}$), что подчеркивает значимость выбора ОВ для достижения желаемых характеристик лазера с распределенной обратной связью.

Экспериментальный результат показал, что в лазере с распределенной обратной связью на основе ВБР длиной 70 мм в ОВ FiberCore I-25 наблюдалось расщепление спектра отражения ВБР, а на длинах волн, связанных с центральной длиной волны брэгговского резонанса ВБР, наблюдался провал интенсивности генерации, связанный с захватом излучения внутри ВБР на этих длинах волн. Данный эффект был подтвержден математическим моделированием.

В работах по созданию лазера с распределенной обратной связью отмечено, что стабилизация длины волны лазерной генерации возможна при введении π -сдвига фазы в середине ВБР. Наш расчет показывает, что введение эффекта чирпирования также стабилизирует длину волны лазерной генерации. Эффект малого чирпирования $\xi = 4.3 \cdot 10^{-3} \text{ nm}/\text{cm}$ достигается при интерферометрическом методе записи ВБР с помощью трансляции лазерного пучка по длине фазовой маски.

Финансирование работы

Исследования выполнены при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.И. Скворцов. *Исследование волоконных лазеров на основе регулярной и случайной распределенной обратной связи на структурах, сформированных методом фемтосекундной поточечной записи*. Автореф. канд. дис. (ИАИЭ СО РАН, Новосибирск, 2024). [Электронный ресурс]. URL: https://www.iae.nsk.su/images/stories/4_Education/3_DisSovet/250228/Автореферат_Скворцов_Михаил_Игоревич.pdf
- [2] I.A. Nechepurenko, A.V. Dorofeenko, O.V. Butov. *Optics Express*, **29** (9), 13657 (2021). DOI: 10.1364/OE.418262
- [3] W. Sun, J. Shi, Y. Yu, X. Feng. *Optics Continuum*, **4** (2), 334 (2021). DOI: 10.1364/OSAC.414523

- [4] X. Zhang, F. Zhang, Sh. Jiang, L. Min, M. Li, G. Peng, J. Ni, Ch. Wang. *Photon. Sensors*, **7** (4), 325–328 (2017). DOI: 10.1007/s13320-017-0453-x
- [5] M.I. Skvortsov, A.A. Wolf, A.A. Vlasov, K.V. Proskurina, A.V. Dostovalov, O.N. Egorova, B.I. Galagan, S. Sverchkov, B.I. Denker, S. Semjonov, S.A. Babin. *Scientific Reports*, **10** (1), 14487 (2020). DOI: 10.1038/s41598-020-71432-w
- [6] Спецификация *FiberCore I-25(980/125)*. [Электронный ресурс]. URL: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/products/doped-fiber/erbium-doped-fiber-isogain/l-band-c-band-erbium-doped-fibers/i-25980125>
- [7] V. Yakimuk, S. Varzhel, I. Moor, Y.I. Yandybaeva, U. Korobkova, V. Klishina, A. Kulikov. *Optik*, **323**, 172216 (2025). DOI: 10.1016/j.jjleo.2025.172216
- [8] Я.Д. Моор, А.В. Куликов, Д.А. Коннов, К.А. Коннов, И.А. Веремеенко, В.В. Савин. *Оптический журнал*, **92** (3), 40–47 (2025). [Ya.D. Moor, A.V. Kulikov, D.A. Konnov, K.A. Konnov, I.A. Veremeenko, V.V. Savin. *J. Optical Technology*, **92** (3), 165–169 (2025). DOI: 10.1364/JOT.92.000165].
- [9] Спецификация *FiberCore I-12(980/125)*. [Электронный ресурс]. URL: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/products/doped-fiber/erbium-doped-fiber-isogain/cl-band-erbium-doped-fibers/i-12980125>
- [10] Спецификация *FiberCore M-12(980/125)*. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thorlabs.com/drawings/174096f82f971055-DC3EBC20-0F1B-D1C7-5918FC55A8D51D87/M12-980-125-MFGSpec.pdf>
- [11] R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*, 2nd ed. (Academic Press, 2010).
- [12] D. Marcuse. *Theory of Dielectric Optical Waveguides*, 2nd ed. (Academic Press, 1991).
- [13] T. Erdogan. *J. Lightwave Technology*, **15** (8), 1277–1294 (1997). DOI: 10.1109/50.61832