



ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 544.174.6:666.223.9:681.7.068
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-108-116
EDN: GYUTJM

И. В. БОГАЧКОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В РАЗНОВИДНОСТЯХ ЭРБИЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В этой работе представлены результаты тестирования параметров рассеяния Мандельштама–Бриллюэна для нескольких видов оптических волокон, легированных ионами эрбия и церия. Приведены полученные бриллюэновские рефлектограммы разных типов. Представлены частотные характеристики бриллюэновского рассеяния. Сделаны оценки начальных значений бриллюэновского частотного сдвига и поведения рефлектограмм уровня обратно отраженного сигнала для исследованных разновидностей волокон. Проведён сравнительный анализ полученных параметров различных видов эрбиевых оптических волокон.

Ключевые слова: рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, бриллюэновская рефлектометрия, эрбиевое оптическое волокно, оптическое волокно с добавлением эрбия и церия, профиль спектра бриллюэновского рассеяния, бриллюэновский частотный сдвиг, классификация волокон.

Введение. Состав разработчиков оптических волокон (ОВ) и поставщиков оптических материалов, используемых при производстве ОВ, оптических устройств и оптических кабелей (ОК), в Российской Федерации после введения санкций существенно изменился [1–8].

ОВ, в котором сделано легирование ионами эрбия различной концентрации (эрбиевое ОВ — EDF), широко используется в оптических (эрбиевых) усилителях (EDFA) [1–4]. Разновидности таких усилителей являются важнейшим элементом подводных

и наземных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), в том числе с волновым (спектральным) разделением каналов (WDM), большой протяжённости [2, 6–10].

Для придания ОВ-EDF свойств устойчивости к действию радиационных воздействий проводят дополнительное легирование ионами церия (EcDF) с концентрацией различной степени [2, 10–12].

Метод бриллюэновской рефлектометрии применяется для раннего обнаружения в волокнах ВОЛС участков с потенциально опасным натяжением.

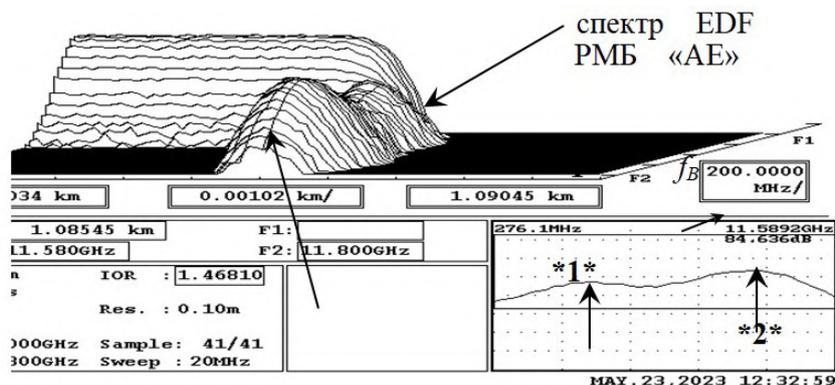


Рис. 1. 3D-BOTDR-рефлектограмма

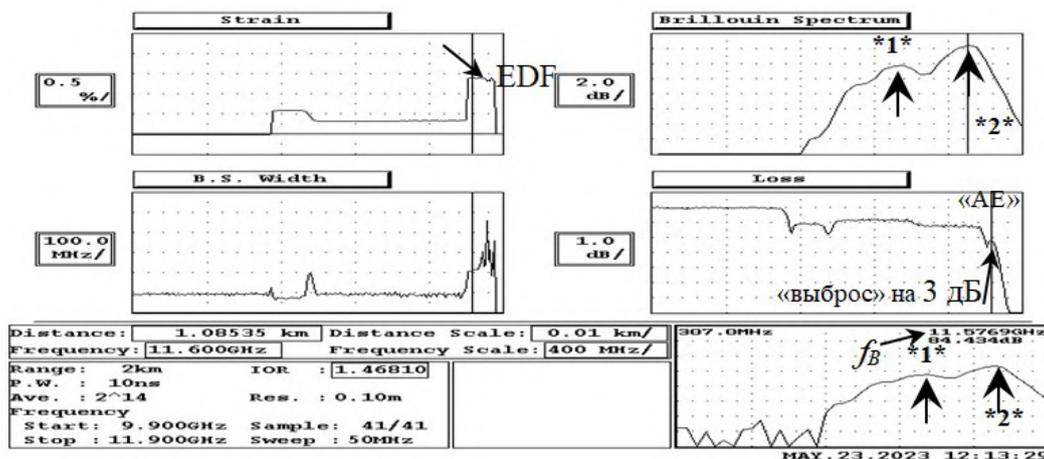


Рис. 2. BOTDR-мультирефлектограмма

Этот метод базируется на исследовании в волокне спектра рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (СРМБ) и определения бриллюэновского частотно-сдвига (БЧС) [3–10]. Для этого следует использовать бриллюэновский рефлектометр (BOTDR).

Поскольку в ОВ-EDF разных видов (например, при разных производителях, при отличающихся концентрациях и составах легирующих добавок и т. п.) могут наблюдаться заметные изменения параметров рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (РМБ) и их частотных зависимостей, необходимо получить BOTDR-рефлектограммы при различных продольных и поперечных механических воздействиях, при разных уровнях тестирующего сигнала на входе ОВ, при температурных изменениях и т. п. [10–14].

В статьях [2, 10–12] уже были представлены результаты ранее проведённых автором исследований характеристик (величины БЧС, графики зависимостей РМБ от частоты) некоторых типов EDF различной длины [11, 12], при разных составах и концентрации примесных добавок.

Постановка задачи. Для всех тестируемых типов ОВ-EDF для исследования параметров РМБ (снятия частотных спектров РМБ, вычисления величин БЧС и т. п.) необходимо получить BOTDR-рефлектограммы.

При содействии сотрудников ЗАО «Москабель–Фуджикура» с помощью BOTDR «Ando AQ 8603» были проведены тестирования ОВ-EDF при различной степени концентрации эрбия и церия, которые были предоставлены сотрудниками Пермского федерального исследовательского центра.

Результаты исследований. В каждом эксперименте первой (в качестве нормализующей катушки, длина — более 1 км) подключается ОВ-G.652 (обычное одномодовое ОВ, рекомендация G.652), а далее — тестируемое волокно.

Под «нормальными условиями» понимается отсутствие механических воздействий на тестируемое ОВ, которое имеет комнатную температуру.

3D-BOTDR-рефлектограмма (пространственное распределение спектра РМБ) для ОВ в EDF разновидности «АЕ» приведена на рис. 1. Значение БЧС (f_B) и график СРМБ указаны в правом нижнем углу рефлектограммы.

На рис. 2 для эрбиевого ОВ марки «АЕ» показана мультирефлектограмма, соответствующая 3D-распределению спектра РМБ, приведённому на рис. 1, — зависимости ширины СРМБ («B. S. Width»), профиля СРМБ («Brillouin Spectrum»), натяжения («Strain») и уровня обратно отражённого сигнала («Loss»), с указанием характерных участков вдоль тестируемого соединения участков оптических волокон.

Во всех экспериментальных исследованиях была установлена минимальная длительность тестирующего импульса (10 нс) бриллюэновского рефлектометра, которая позволила получить максимальную реальную разрешающую способность измерения (порядка 1 м по расстоянию).

На графиках зависимостей по длине световода ярко выделяются места соединений ОВ разных типов.

На графике «Loss» в начале эрбиевого ОВ хорошо заметен «выброс» на +3 дБ. Однако для ОВ-

EDF длиной более 3 м далее по длине световода мы наблюдаем явное и резкое падение уровня обратно отражённого сигнала. Из-за этого не будут отображаться на рефлектограммах сигналы от других секций ОВ, которые в световоде будут находиться далее (после ОВ-EDF).

Данный эффект позволяет отличать эрбиевые и эрбиево-цериевые волокна от других разновидностей ОВ [2, 10–12].

Подобные эффекты у других (не эрбиевых) волокон не были обнаружены («подъёмы» на графиках уровня обратно отраженного сигнала наблюдались только при нагревании участков волокон) [2, 10–17].

Значение БЧС для эрбиевого ОВ марки «АЕ» при нормальных условиях составляет 11,6 ГГц. При этом оно находится на втором «пике», а не как у большинства ОВ на первом «пике», который наблюдается на частоте 11,2 ГГц.

Большой уровень второго «пика» по сравнению с первым наблюдается весьма редко. Подобные эффекты ранее обнаруживались только в волокнах со значительной концентрацией фтора в сердечнике ОВ [13–20].

Изменения параметров РМБ (в частности, БЧС) в зависимости от состава и преимущественной концентрации легирующих веществ различных типов (фтора, оксидов алюминия, германия, фосфора и добавок других видов) ранее обсуждались в работах [1–3, 5, 8–10].

Для сравнения: у ОВ-G.652 БЧС находится в пределах от 10,82 ГГц до 10,85 ГГц, имеется один ярко выраженный максимум, а подъёма уровня на графике обратно отражённого сигнала не наблюдается.

Исследования влияния распространенных легирующих веществ на оптические и акустические параметры ОВ, связанные с характеристиками РМБ, показали, что существуют легирующие добавки, которые с ростом концентрации повышают как оптический показатель преломления, так и акустический (GeO_2 , P_2O_5 , TiO_2 и т. п.) [1–3, 5].

Иные легирующие вещества (Y_2O_3 и Al_2O_3) снижают акустический показатель преломления, но повышают оптический [1, 5].

Есть и примеси, которые понижают оптический показатель преломления, но повышают акустический (B_2O_3 и F) [1, 5].

Поведение основной оптической моды (в одномодовых ОВ только она и учитывается) можно описать уравнением (1):

$$\frac{\partial^2 F(r)}{\partial r^2} + \frac{\partial F(r)}{r \partial r} + \left(\frac{\omega_L^2 n(r)}{c^2} - \beta_L^2 \right) F(r) = 0. \quad (1)$$

Для основной оптической моды $F(r)$ при двухступенчатой структуре профиля $n(r)$ можно определить по формуле:

$$F(r) = \begin{cases} C_0 J_0(ur) & \text{при } r \leq a, \\ C_0 J_0(au) K_0(wr) / K_0(aw) & \text{при } a < r < b, \end{cases} \quad (2)$$

где C_i — некоторые константы, $u = \sqrt{(n_i^2 \omega_L^2 / c^2 - \beta^2)}$, $w = \sqrt{(\beta^2 - n_{ог}^2 \omega_L^2 / c^2)}$, J_0 и N_0 — обыкновенные функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка, I_0 и K_0 — модифицированные функции Бесселя нулевого порядка первого и второго рода соответственно.

При заданной структуре тестируемых ОВ необходимо выявить характеристики акустических мод, что позволит для проходящего оптического сигнала в итоге определить частотные и амплитудные параметры РМБ [1].

Эквивалентная площадь акустооптического взаимодействия гипер акустической моды m -го порядка (A_{Am} — акустооптическая эффективная площадь) и эффективная оптическая площадь ($A_{эфф}$) может быть вычислена по таким формулам:

$$A_{Am} = \left(\frac{\langle F^2(r) \rangle}{\langle F^2(r) \cdot \xi_m(r, \phi) \rangle} \right)^2 \langle \xi_m^2(r, \phi) \rangle, \quad (3)$$

$$A_{эфф} = \frac{(\langle F^2(r) \rangle)^2}{\langle F^4(r) \rangle},$$

где $F(r)$ — распределение амплитуды основной оптической моды одномодового ОВ, а $\xi_m(r, \phi)$ — распределение амплитуды акустической моды m -го порядка по поперечному сечению ОВ.

Вычисляемые величины усредняются по поперечному сечению ОВ, что отражается в представлении «угловыми» скобками. Распределение эквивалентной акустооптической площади по поперечному сечению ОВ задаёт характер акустооптического взаимодействия, влияет на значение пороговой мощности вынужденного РМБ в ОВ и является важным показателем, определяющим характеристики РМБ.

Комбинируя слои волокон различных по составу, различной концентрации толщины слоёв и т. п., возможно изменять характеристики РМБ в значительных интервалах:

$$n = 1,458(1 + 1,0 \cdot 10^{-3} w_{GO} - 3,3 \cdot 10^{-3} w_F),$$

$$\rho = 2200(1 + 6,4 \cdot 10^{-3} w_{GO} - 3,4 \cdot 10^{-3} w_F),$$

$$v_{Az} = 5,944(1 - 7,2 \cdot 10^{-3} w_{GO} - 2,7 \cdot 10^{-2} w_F),$$

$$v_{Ar} = 3,749(1 - 6,4 \cdot 10^{-3} w_{GO} - 2,7 \cdot 10^{-2} w_F), \quad (4)$$

где v_{Az} — продольная гипер акустическая скорость (км/с), v_{Ar} — поперечная (сдвиговая) гипер акустическая скорость (км/с), w_{GO} — концентрация (в %) оксида германия (GeO_2), w_F — концентрация (в %) фтора [1–5].

Таким образом, в волокнах различных типов и разных изготовителей различия в частотных и (для волокон, легированных эрбием, а также эрбием с примесью церия различных концентраций) амплитудных характеристиках РМБ позволяют выявить существенные отличия, что позволит (с учётом формул (1)–(3) аппарата анализа РМБ и построения частотных характеристик РМБ) осуществить автоматизированную классификацию типа ОВ.

Если EDF «АЕ» нагреть до температуры +70 °С, то наблюдается смещение спектра РМБ в сторону повышения частоты, и БЧС составит 11,63 ГГц, при этом положение первого «пика» будет 11,27 ГГц.

При температурных изменениях наблюдается линейная зависимость БЧС от температуры. При этом также наблюдаются смещения на графике уровня обратно отражённого сигнала: подъём характеристики при нагреве и спад при охлаждении участка волокна [1].

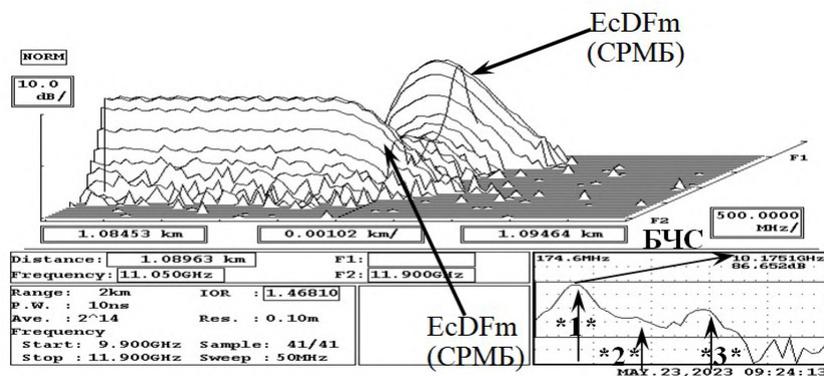


Рис. 3. 3D-BOTDR-рефлектограмма при малой концентрации церия в OB-EcDF (EcDFm)

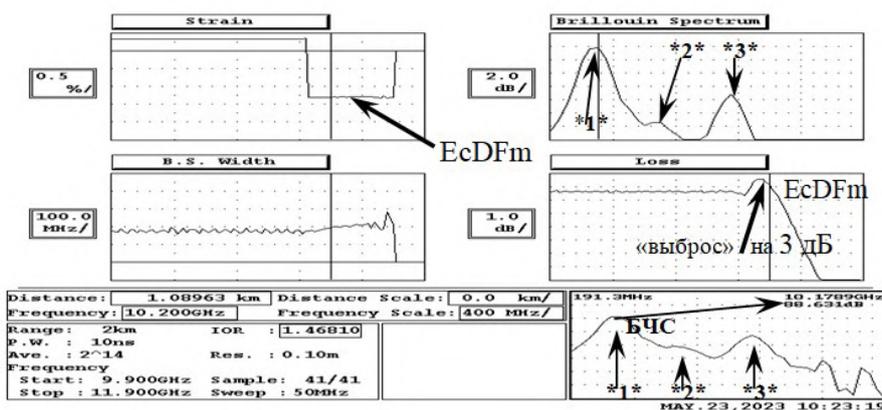


Рис. 4. BOTDR-мультирефлектограмма при малой концентрации церия (EcDFm)

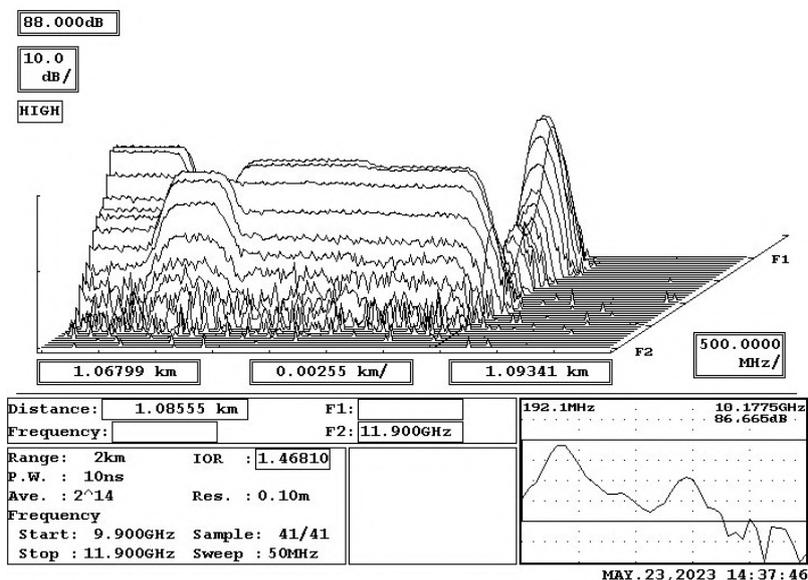


Рис. 5. Пространственное распределение спектра РМБ в EcDF при повышенной концентрации церия (EcDFb)

Это позволяет различать изменения БЧС, вызванные продольным механическим натяжением («Strain»), от смещения БЧС из-за температурных изменений, поскольку описанного выше подъёма характеристики уровня обратно отражённого сигнала при нагреве OB не наблюдается [1, 2].

На рис. 3 показана 3D-рефлектограмма распределения спектра РМБ для OB-EcDF при малой концентрации церия (EcDFm) при нормальных услови-

ях. В правом нижнем углу (рис. 3) показан профиль спектра РМБ и величина БЧС.

Частотная характеристика РМБ EcDFm имеет «главный максимум» (БЧС), который обнаруживается на частоте 10,18 ГГц. Следует отметить, что при этом наблюдаются побочные «выбросы»: второй (практически незаметный) — на частоте 10,60 ГГц и третий (средний по уровню, примерно на 7 дБ меньше основного) — на частоте 11,05 ГГц.

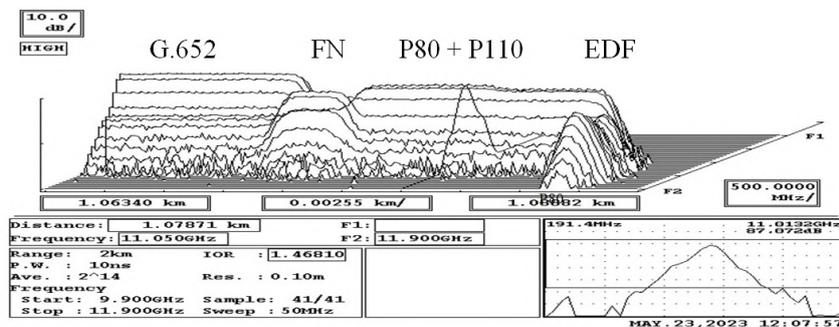


Рис. 6. 3D-BOTDR-рефлектограмма CPMB для световода с эрбиевым ОВ на конце

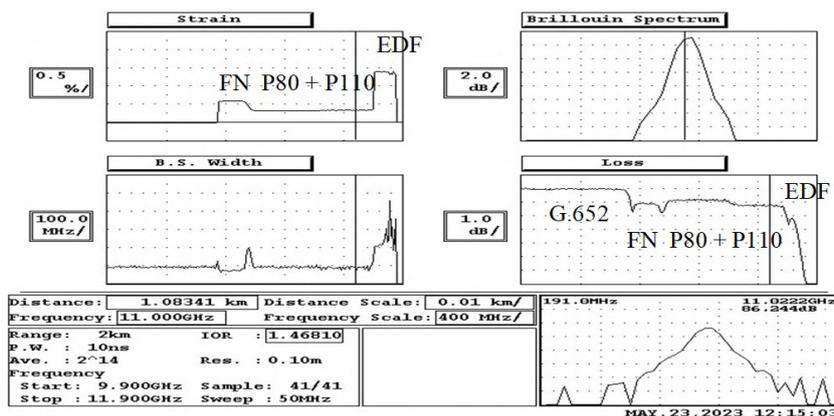


Рис. 7. Бриллюэновская мультирефлектограмма для световода с эрбиевым ОВ на конце

На рис. 4 для волокна EcDFm приведена полученная мультирефлектограмма, соответствующая 3D-распределению спектра РМБ, представленному с указанием характерных участков и положения БЧС на рис. 3.

Если EcDFm нагреть до температуры $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, то наблюдается смещение спектра РМБ в сторону повышения частоты, и БЧС составит 10,21 ГГц, при этом положение третьего «пика» будет 11,10 ГГц.

3D-BOTDR-рефлектограмма ОВ EcDF при повышенной концентрации церия (EcDFb) приведена на рис. 5.

Частотная характеристика EcDFb имеет «главный максимум», который обнаруживается на частоте 10,19 ГГц (БЧС). Следует отметить, что при этом наблюдаются побочные «выбросы»: второй (малозаметный) — на частоте 10,7 ГГц и третий (средний по уровню, примерно на 8 дБ меньше основного) — на частоте 11,1 ГГц.

На рис. 6 представлена 3D-BOTDR-рефлектограмма CPMB вдоль световода (G.652 — нормализующая катушка; остальные ОВ G.654: «Fujikura nature» (сокращённое обозначение — «FN»), «Fujikura Pure Advance 80» (сокращённое обозначение — «P80») и «Fujikura Pure Advance 110» (сокращённое обозначение — «P110»), — и в самом конце световода (как «поглотитель» остаточного сигнала) — эрбиевое волокно — «EDF»).

На рис. 7 представлена бриллюэновская мультирефлектограмма, соответствующая распределению спектральных характеристик РМБ.

Из рис. 6 и рис. 7 видно, что при проведении измерений отрезок эрбиевого ОВ (при длине более 3 метров) на конце тестируемого световода выполняет роль поглотителя сигнала.

Излучение от лазерного источника (длина волны BOTDR составляет 1,55 мкм) стремительно (по длине ОВ) поглощается в эрбиевом ОВ, как излучение накачки (хотя для него оптимальные длины волн выбираются другими, и усиление оптического сигнала наблюдается именно на длине волны, равной 1,55 мкм), и это приводит к некоторому усилению уровня обратно отражённого сигнала на самых первых метрах эрбиевого ОВ.

Усиление на частотах основного сигнала в эрбиевых ОВ происходит благодаря дополнительно вводимому в это ОВ излучению накачки, которое имеет другие оптимальные диапазоны длин волн, возбуждающие ионы эрбия.

В результате физических процессов наблюдается существенное усиление передаваемого информационного оптического сигнала [10–12].

Изменения уровня мощности тестирующего сигнала, вводимого в эрбиевое ОВ, — как при увеличении, так и при уменьшении мощности, — не приводят к принципиальным изменениям на графиках уровня обратно отраженного сигнала: графики сдвигаются по оси ординат («Loss»), но не изменяют характер зависимости от продольных координат световода, а также место и относительную величину «выброса».

На рис. 8 приведена развёрнутая зависимость уровня обратно отраженного сигнала вдоль световода, содержащего эрбиевое ОВ, при различных значениях мощности тестирующего сигнала, вводимого в исследуемый световод («Н» — «high» — повышенный, «N» — «normal» — нормальный, «L» — «low» — пониженный).

Следует отметить, что при повышенных мощностях сигнала на бриллюэновских рефлектограммах

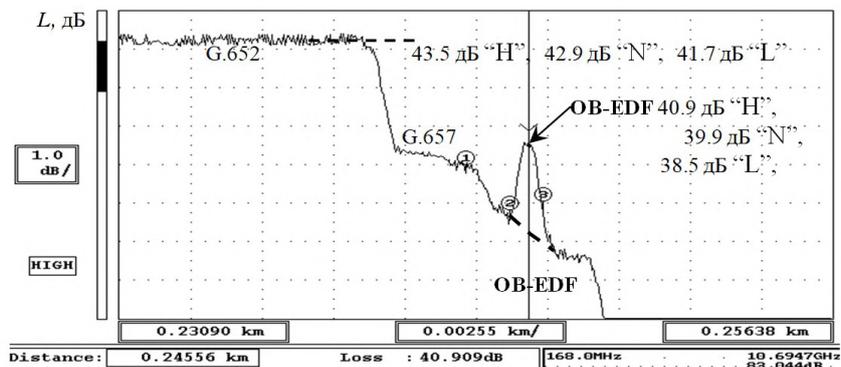


Рис. 8. Зависимость уровня обратно отраженного сигнала вдоль световода, содержащего эрбиевое ОБ, при различных значениях мощности тестирующего сигнала

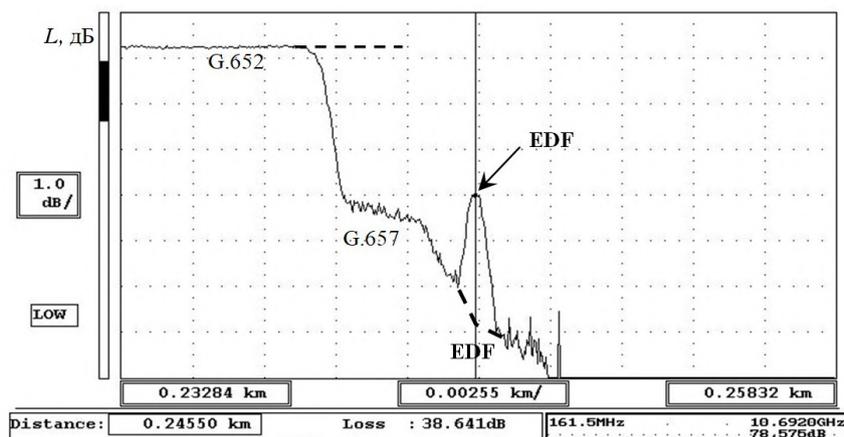


Рис. 9. График уровня обратно отраженного сигнала вдоль световода с EDF при пониженном значении мощности тестирующего сигнала на входе

Таблица 1

Значения БЧС и «пиков» СРМБ в ОБ при нормальных условиях

Тип EDF	Значения 1-го «пика» СРМБ, ГГц	Значения 2-го «пика» СРМБ, ГГц	Значения 3-го «пика» СРМБ, ГГц	БЧС (f_{B0}), ГГц
EcDFm	10,17 ... 10,18	(min) 10,60 ... 10,65	11,04 ... 11,05	10,18
EcDFb	10,18 ... 10,20	(min) 10,70	11,07 ... 11,10	10,19
EDF «АЕ»	11,20...11,22	(max!) 11,59...11,60	нет	11,59
EDF-01	10,69 ... 10,71	нет	нет	10,70
EDF-02	10,94 ... 10,96	нет	нет	10,95
EcDF-01	10,37 ... 10,39	11,10	нет	10,38
EDF-01	10,69 ... 10,71	нет	нет	10,70

могут проявляться эффекты, подобные «зашумлению» (начальные значения графика для ОБ-G.652 на участке 231 м–237 м). Однако это связано не с какими-либо помехами, а с нелинейными эффектами, ограничивающими реальный уровень сигнала в ОБ, которые проявляются при превышении пороговых значений для изучаемой разновидности ОБ, подобно входному сигналу в усилителе-ограничителе.

При нормальном уровне сигнала («N») эффект «зашумления» заметно уменьшается, а при пониженном уровне сигнала («L») — полностью исчеза-

ет (график становится «гладким»), что хорошо заметно на рис. 9 (на участке 232 м–237 м).

Обсуждение результатов. Значения «пиков» СРМБ для всех протестированных типов ОБ-EDF, а также некоторых других ОБ-EDF, исследованных автором ранее [1, 2, 10–12], приведены в табл. 1.

По полученным BOTDR-рефлектограммам можно снять частотные характеристики РМБ различных типов эрбиевых ОБ, а затем установить для каждой разновидности начальное значение (при нормальных условиях) БЧС (f_{B0}).

Выводы и заключение. На основе экспериментальных исследований с помощью BOTDR-рефлектограмм были вычислены величины БЧС при нормальных условиях для всех протестированных типов эрбиевых волокон, а также определены их параметры РМБ.

Для автоматизации обработки BOTDR-рефлектограмм и классификации разновидностей ОВ и можно использовать различия в частотных характеристиках РМБ и значениях БЧС.

Наличие «горба» («выброса») на графике «потерь» позволяет различать эрбиевые волокна от других разновидностей ОВ.

Изменения уровня мощности сигнала, вводимого в эрбиевое ОВ, не приводят к принципиальным изменениям на графиках уровня обратно отраженного сигнала.

При протяженности эрбиевого ОВ более 3 метров последующие ОВ в световоде не будут заметны на BOTDR-рефлектограммах из-за поглощения тестирующего сигнала в EDF.

При измерениях отрезков эрбиевого ОВ длиной более 3 метров на конце тестируемого световода выполняет роль поглотителя сигнала.

Библиографический список

1. Богачков И. В. Определение разновидностей оптических волокон и ранняя диагностика их физического состояния на основе анализа характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 107–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-107-116. EDN: XDUAQS.
2. Bogachkov I. V. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter spectrum in the erbium-doped optical fiber // T-comm. 2017. Vol. 11, № 6. P. 59–63.
3. Ruffin A. B., Li M.-J., Chen X. [et al.]. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices // Optics Letters. 2005. Vol. 30 (23). P. 3123–3125. DOI: 10.1364/ol.30.003123.
4. Krivosheev A. I., Konstantinov Y. A., Barkov F. L. [et al.]. Comparative analysis of the Brillouin frequency shift determining accuracy in extremely noised spectra by various correlation methods // Instruments and experimental techniques. 2021. Vol. 64 (5). P. 715–719. DOI: 10.1134/S0020441221050067. EDN: UVUFPF.
5. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S. [et al.]. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers // Lightwave Technol. 2004. Vol. 22 (2). P. 631–639. DOI: 10.1109/JLT.2003.822007.
6. Belokrylov M. E., Claude D., Konstantinov Y. A. [et al.]. Method for increasing the signal-to-noise ratio of Rayleigh backscattered radiation registered by a frequency domain optical reflectometer using two-stage erbium amplification // Instruments and Experimental Techniques. 2023. Vol. 66 (5). P. 761–768. DOI: 10.1134/S0020441223050172.
7. Krivosheev A. I., Barkov F. L., Konstantinov Y. A. [et al.]. State-of-the-Art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing // Instruments and Experimental Techniques. 2022. Vol. 65 (5). P. 687–710. DOI: 10.1134/S0020441222050268.
8. Kobayakov A., Sauer M., Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers // Advances in Optics and Photonics. 2010. Vol. 2 (1). P. 1–59. DOI: 10.1364/AOP.2.000001.
9. Bao X., Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors // Sensors. 2011. Vol. 11. P. 4152–4187. DOI: 10.3390/s110404152.
10. Bogachkov I. V., Trukhina A. I., Gorlov N. I. The study of the Mandelstam–Brillouin scattering in erbium optical fibers //

Systems of signals generating and processing in the field of onboard communications – Proceedings. Moscow, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706720. EDN: PXJTGI.

11. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter features in the erbium-doped optical fiber // 14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2018): Proceedings. In 8 vols. Novosibirsk, 2018. Vol. 1, Part 1. P. 322–326. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545024. EDN: MBEXYM.

12. Bogachkov I. V. The experimental researches of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics in erbium optical fibers of various kinds // T-comm. 2019. Vol. 13, № 4. P. 70–75.

13. Tartara L., Codemard C., Maran J. [et al.]. Full Modal Analysis of the Brillouin Gain Spectrum of an Optical Fiber // Optics Communications. 2009. Vol. 282 (2). P. 2431–2436. DOI: 10.1016/j.optcom.2009.03.012.

14. Dragic P. D. Estimating the effect of Ge doping on the acoustic damping coefficient via a highly Ge-doped MCVD silica fiber // Journal of the Optical Society of America B. 2009. Vol. 26 (8). P. 1614–1620. DOI: 10.1364/JOSAB.26.001614.

15. Law P.-C., Liu Y.-Sh., Croteau A., Dragic P. D. Acoustic coefficients of P₂O₅-doped silica fiber: acoustic velocity, acoustic attenuation, and thermo-acoustic coefficient // Optical Materials Express. 2011. Vol. 1, № 4. P. 686–699. DOI: 10.1364/OME.1.000686.

16. Zou W., He Z., Hotate K. Experimental study of Brillouin scattering in fluorine-doped single-mode optical fibers // Optics Express. 2008. Vol. 16. P. 18804–18812. DOI: 10.1364/OE.16.018804.

17. Gorshkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A. [et al.]. Scientific applications of distributed acoustic sensing: State-of-the-Art review and perspective // Sensors 2022. Vol. 22, № 1033. DOI: 10.3390/s22031033.

18. Barkov F. L., Konstantinov Y. A., Krivosheev A. I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain reflectometry // Fibers. 2020. Vol. 8, № 9. P. 1–11. DOI: 10.3390/FIB8090060.

19. Afshar S., Kalosha V. P., Bao X., Chen L. Enhancement of stimulated Brillouin scattering of higher-order acoustic modes in single-mode optical fiber // Optics Letters. 2005. Vol. 30 (20). P. 2685–2687. DOI: 10.1364/OL.30.002685.

20. Park K., Jeong Y. A quasi-mode interpretation of acoustic radiation modes for analyzing Brillouin gain of acoustically antiguiding optical fibers // Optics Express. 2014. Vol. 22, № 7. P. 2–13. DOI: 10.1364/OE.22.007932.

БОГАЧКОВ Игорь Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 7115-6052

AuthorID (РИНЦ): 276415

ORCID: 0000-0002-7019-1784

AuthorID (SCOPUS): 3699775670

ResearcherID: A-7770-2015

Адрес для переписки: bogachkov@mail.ru

Для цитирования

Богачков И. В. Анализ характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в разновидностях эрбиевых оптических волокон // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 108–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-108-116.

Статья поступила в редакцию 07.09.2024 г.

© И. В. Богачков

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF MANDELSTAM–BRILLOUIN SCATTERING IN VARIETIES OF ERBIUM OPTICAL FIBERS

The research presents the results of testing the Mandelstam–Brillouin scattering parameters for several types of optical fibers doped with erbium and cerium ions. The obtained Brillouin reflectograms of different types are shown. The frequency characteristics of Brillouin scattering are drawn. Estimates of the initial values of the Brillouin frequency shift and the behavior of the reflectograms of the back reflected signal level for the studied fiber varieties are presented. A comparative analysis of the obtained parameters of various types of erbium optical fibers is carried out.

Keywords: Mandelstam–Brillouin backscatter spectrum, Brillouin reflectometry, erbium optical fiber, optical fiber with addition of erbium and cerium, Brillouin spectrum profile, Brillouin frequency shift, classification of fibers.

References

1. Bogachkov I. V. Opredeleniye raznovidnostey opticheskikh volokon i rannaya diagnostika ikh fizicheskogo sostoyaniya na osnove analiza kharakteristik rasseyaniya Mandel'shtama–Brillyuena [Determination of optical fiber varieties and early diagnosis of their physical condition based on the analysis of Mandelstam–Brillouin backscatter parameters] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 107–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-107-116. EDN: XDUAQS. (In Russ.).
2. Bogachkov I. V. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter spectrum in the erbium-doped optical fiber // T-comm. 2017. Vol. 11, no. 6. P. 59–63. (In Engl.).
3. Ruffin A. B., Li M.-J., Chen X. [et al.]. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30 (23). P. 3123–3125. DOI: 10.1364/ol.30.003123. (In Engl.).
4. Krivosheev A. I., Konstantinov Y. A., Barkov F. L. [et al.]. Comparative analysis of the Brillouin frequency shift determining accuracy in extremely noised spectra by various correlation methods // *Instruments and experimental techniques*. 2021. Vol. 64 (5). P. 715–719. DOI: 10.1134/S0020441221050067. EDN: UVUFPF. (In Engl.).
5. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S. [et al.]. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers // *Lightwave Technol.* 2004. Vol. 22 (2). P. 631–639. DOI: 10.1109/JLT.2003.822007. (In Engl.).
6. Belokrylov M. E., Claude D., Konstantinov Y. A. [et al.]. Method for increasing the signal-to-noise ratio of Rayleigh back-scattered radiation registered by a frequency domain optical reflectometer using two-stage erbium amplification // *Instruments and Experimental Techniques*. 2023. Vol. 66 (5). P. 761–768. DOI: 10.1134/S0020441223050172. (In Engl.).
7. Krivosheev A. I., Barkov F. L., Konstantinov Y. A. [et al.]. State-of-the-Art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing // *Instruments and Experimental Techniques*. 2022. Vol. 65 (5). P. 687–710. DOI: 10.1134/S0020441222050268. (In Engl.).
8. Kobyakov A., Sauer M., Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers // *Advances in Optics and Photonics*. 2010. Vol. 2 (1). P. 1–59. DOI: 10.1364/AOP.2.000001. (In Engl.).
9. Bao X., Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors // *Sensors*. 2011. Vol. 11. P. 4152–4187. DOI: 10.3390/s110404152. (In Engl.).
10. Bogachkov I. V., Trukhina A. I., Gorlov N. I. The study of the Mandelstam–Brillouin scattering in erbium optical fibers // *Systems of signals generating and processing in the field of onboard communications – Proceedings. Moscow, 2019*. P. 1–6. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706720. EDN: PXJTGI. (In Engl.).
11. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter features in the erbium-doped optical fiber // *14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2018): Proceedings*. In 8 vols. Novosibirsk, 2018. Vol. 1, Part 1. P. 322–326. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545024. EDN: MBEXYM. (In Engl.).
12. Bogachkov I. V. The experimental researches of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics in erbium optical fibers of various kinds // *T-comm*. 2019. Vol. 13, no. 4. P. 70–75. (In Engl.).
13. Tartara L., Codemard C., Maran J. [et al.]. Full Modal Analysis of the Brillouin Gain Spectrum of an Optical Fiber // *Optics Communications*. 2009. Vol. 282 (2). P. 2431–2436. DOI: 10.1016/j.optcom.2009.03.012. (In Engl.).
14. Dragic P. D. Estimating the effect of Ge doping on the acoustic damping coefficient via a highly Ge-doped MCVD silica fiber // *Journal of the Optical Society of America B*. 2009. Vol. 26 (8). P. 1614–1620. DOI: 10.1364/JOSAB.26.001614. (In Engl.).
15. Law P.-C., Liu Y.-Sh., Croteau A., Dragic P. D. Acoustic coefficients of P₂O₅-doped silica fiber: acoustic velocity, acoustic attenuation, and thermo-acoustic coefficient // *Optical Materials Express*. 2011. Vol. 1, no. 4. P. 686–699. DOI: 10.1364/OME.1.000686. (In Engl.).
16. Zou W., He Z., Hotate K. Experimental study of Brillouin scattering in fluorine-doped single-mode optical fibers // *Optics Express*. 2008. Vol. 16. P. 18804–18812. DOI: 10.1364/OE.16.018804. (In Engl.).
17. Gorchkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A. [et al.]. Scientific applications of distributed acoustic sensing: State-of-the-Art review and perspective // *Sensors* 2022. Vol. 22, no. 1033. DOI: 10.3390/s22031033. (In Engl.).
18. Barkov F. L., Konstantinov Y. A., Krivosheev A. I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain

reflectometry // *Fibers*. 2020. Vol. 8, no. 9. P. 1–11. DOI: 10.3390/FIB8090060. (In Engl.).

19. Afshar S., Kalosha V. P., Bao X., Chen L. Enhancement of stimulated Brillouin scattering of higher-order acoustic modes in single-mode optical fiber // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30 (20). P. 2685–2687. DOI: 10.1364/OL.30.002685. (In Engl.).

20. Park K., Jeong Y. A quasi-mode interpretation of acoustic radiation modes for analyzing Brillouin gain of acoustically antiguiding optical fibers // *Optics Express*. 2014. Vol. 22, no. 7. P. 2–13. DOI:10.1364/OE.22.007932. (In Engl.).

BOGACHKOV Igor Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Communications and Information Security Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7115-6052

AuthorID (RSCI): 276415

ORCID: 0000-0002-7019-1784

AuthorID (SCOPUS): 3699775670

ResearcherID: A-7770-2015

Correspondence address: bogachkov@mail.ru

For citations

Bogachkov I. V. Analysis of the characteristics of Mandelstam–Brillouin scattering in varieties of erbium optical fibers // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 108–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-108-116.

Received September 07, 2024.

© I. V. Bogachkov