

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ¹

© 2023 г. И. В. Богачков^{a,*}, Н. И. Горлов^{b,**}

^aОмский государственный технический университет
Россия, 644050, Омск, пр. Мира, 11

^bСибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Россия, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86

*e-mail: bogachkov@mail.ru

**e-mail: gorlovnik@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.02.2023 г.

После доработки 16.04.2023 г.

Принята к публикации 16.04.2023 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна для одномодовых оптических волокон различных видов и разных производителей. Приведены экспериментальные зависимости оптических волокон, полученные с помощью бриллюэновского оптического рефлектометра (графики распределения спектра бриллюэновского рассеяния по длине световода и мультирефлектограммы). Для каждой рассмотренной разновидности оптических волокон дана оценка бриллюэновского частотного сдвига, величина которого при длинах волн излучения лазеров, применяемых в телекоммуникационных системах, относится к диапазону СВЧ. Представлены частотные зависимости характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна некоторых разновидностей одномодовых оптических волокон с различными длинами волн отсечки. Проведен сравнительный анализ их характеристик с характеристиками ранее исследованных одномодовых оптических волокон. Оптические волокна схожих разновидностей (но разных производителей) могут иметь заметные различия в частотных характеристиках рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Представлена таблица с основными характеристиками рассеяния Мандельштама–Бриллюэна для всех исследованных в экспериментах одномодовых оптических волокон.

DOI: 10.31857/S0032816223050063, EDN: ZJCJVB

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует большое количество разновидностей одномодовых оптических волокон (ОВ) разных производителей. Каждая из этих разновидностей ОВ (в том числе специализированных ОВ) была разработана для решения определенных задач [1–5].

За последние годы существенно изменился состав производителей ОВ, которые используются для изготовления оптических кабелей на территории России. Кроме того, также значительно изменился состав поставщиков оптических материалов, необходимых для производства ОВ.

Классификация конкретных разновидностей ОВ (в том числе схожих по назначению и свой-

ствам, но различных производителей) в проложенных оптических кабелях, а также оценка их оптических характеристик является актуальной задачей [6–9].

С помощью графиков, полученных на бриллюэновском рефлектометре, можно классифицировать тип ОВ в проложенном оптическом кабеле, поскольку даже волокна одной разновидности, но разных производителей имеют заметные различия в частотных характеристиках рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (МБ) [2, 8].

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик РМБ с помощью бриллюэновского рефлектометра некоторых сравнительно новых разновидностей одномодовых оптических волокон с различными длинами волн отсечки (G.654, G.652 и т.п. (G.65x – номер рекомендации МСЭ–Т)).

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

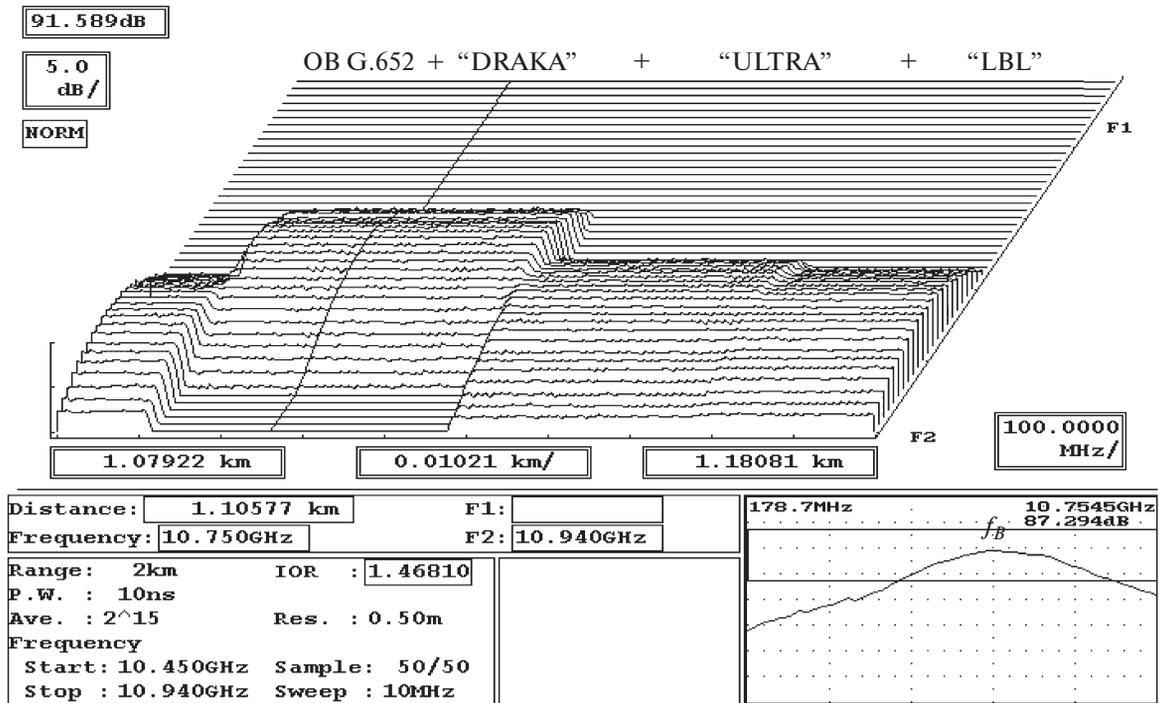


Рис. 1. Пространственное распределение спектров рассеяния МБ для световода, составленного из ОБ G.652 + “DRAKA” + ULTRA + LBL.

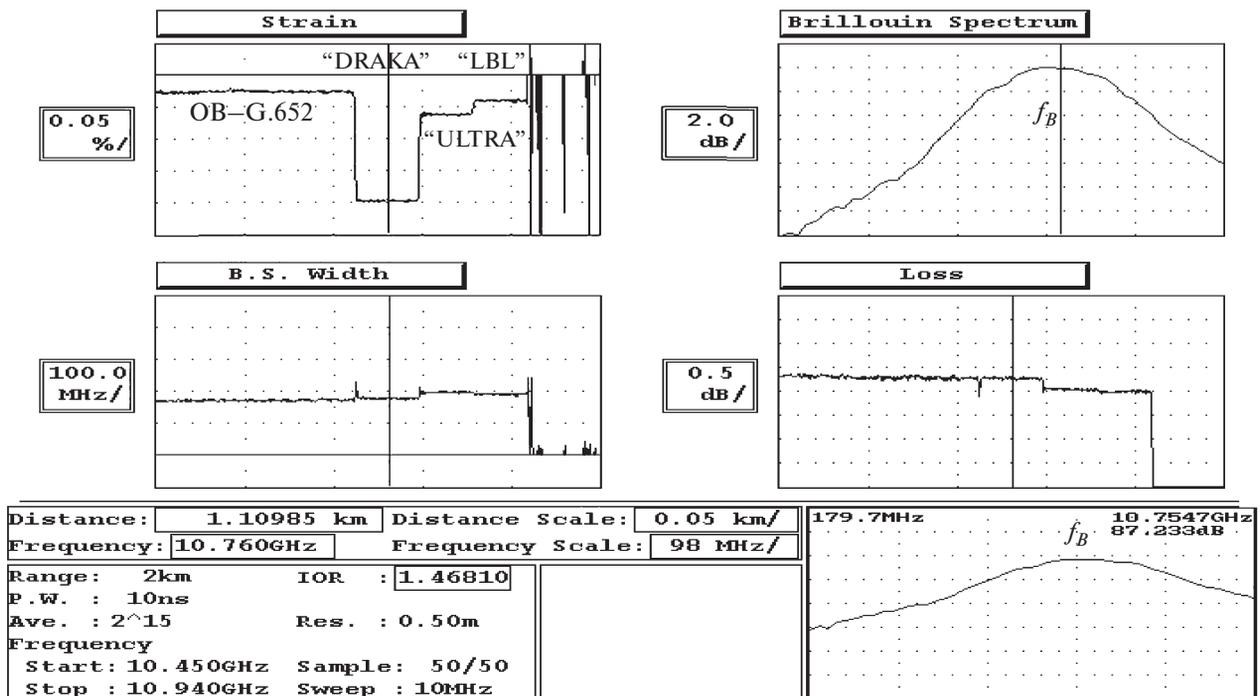


Рис. 2. Мультирефлектограмма для световода, составленного из ОБ G.652 + “DRAKA” + ULTRA + LBL.

Таблица 1

| Разновидность ОВ | Значения f_{B0} , ГГц | Рекомендуемые значения f_{B0} , ГГц |
|---------------------|----------------------------|--|
| G.652 | 10.82...10.86 | 10.84 |
| G.652 (“ULTRA”) | 10.82...10.83 | 10.82 |
| G.652 (“LBL”) | 10.84 | 10.84 |
| G.652–200 мкм | 10.76...10.78 | 10.77 |
| G.652 “H” (1235) | 10.806...10.810 | 10.81 |
| G.652 “H” (1305) | 10.778...10.820 | 10.78 |
| G.653 (DSF) | 10.47...10.49 | 10.47 |
| G.654E “H” | 11.021...11.025 | 11.02 |
| G.655 (NZDSF) | 10.61...10.64 | 10.63 |
| G.655–2 | 10.47...10.48 | 10.48 |
| G.655 (“LEAF”) | 10.66...10.67 | 10.66 |
| G.657 | 10.77...10.80 | 10.79 |
| G.657 “H” | 10.694 | 10.69 |
| “DRAKA” “H” | 10.754...10.755 | 10.75 |
| DCF | 9.77 | 9.77 |
| EDF | 10.69...10.71 | 10.70 |
| EDF–2 | 10.95 | 10.95 |
| ECDF | 10.38...10.39 | 10.38 |
| “Panda” | 10.40...10.43 | 10.42 |
| “Panda PS-887” | 10.55...10.56 | 10.55 |

Примечание. G.653 (DSF) – ОВ со смещенной (нулевой) дисперсией, G.655 – ОВ с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF), “LEAF” – ОВ фирмы “Corning” (разновидность G.655) [1–6, 10], DCF – ОВ с компенсацией дисперсии; EDF – ОВ, легированное ионами эрбия, ECDF – ОВ, легированное ионами эрбия и церия, устойчивое к действию радиации [9, 16], “Panda” – ОВ, сохраняющие состояние поляризации (PMF) [9, 17–20].

Результаты экспериментальных исследований характеристик рассеяния МБ многих разновидностей одномодовых ОВ, проведенных авторами ранее, представлены в работах [1–5, 8, 9].

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения параметров рассеяния МБ (частотных характеристик рассеяния МБ, спектра рассеяния МБ) и оценки величин бриллюэновского частотного сдвига, (частоты главного максимума спектра рассеяния МБ) для всех анализируемых разновидностей одномодовых ОВ необходимо получить бриллюэновские рефлектограммы [1–17]. При длинах волн излучения лазеров, применяемых в телекоммуникационных системах, величины бриллюэновского частотного сдвига одномодовых ОВ относятся к диапазону СВЧ.

С этой целью были проведены экспериментальные исследования с бриллюэновским оптическим импульсным рефлектометром “Ando AQ 8603” при содействии ЗАО “Москабель–Фуджикура” (Москва).

По общим рефлектограммам, полученным с помощью бриллюэновского оптического импульсного рефлектометра, можно изучать профили спектров рассеяния МБ различных типов ОВ в составе общего световода, определять величины бриллюэновского частотного сдвига в них и наблюдать изменения спектров рассеяния МБ при изменении внешних воздействий на ОВ [1–6].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В каждом эксперименте первым ОВ (нормализующая катушка длиной примерно 1 км) является ОВ G.652, а за ним присоединяются исследуемые разновидности ОВ.

На рис. 1 представлено пространственное распределение спектров рассеяния МБ для ОВ при соединении ОВ G.652 со световодом, составленным из соединений ОВ “DRAKA” + ОВ “ULTRA” + ОВ “LBL” (ОВ “ULTRA” и ОВ “LBL” – разновидности ОВ G.652 фирмы “Corning”).

В правом нижнем углу всех представленных бриллюэновских рефлектограмм показаны частотные профили спектров рассеяния МБ и величины (бриллюэновский частотный сдвиг $-f_B$) для исследуемых разновидностей ОВ [1–3].

Анализ характеристик спектров рассеяния МБ позволяет выделить участки с каждой разновидностью ОВ, которые входят в состав световода.

На рис. 2 для ОВ G.654E показана мультирефлектограмма, которая представляет пространственные зависимости (по всей длине световода) уровня обратно отраженного сигнала (Loss), на-

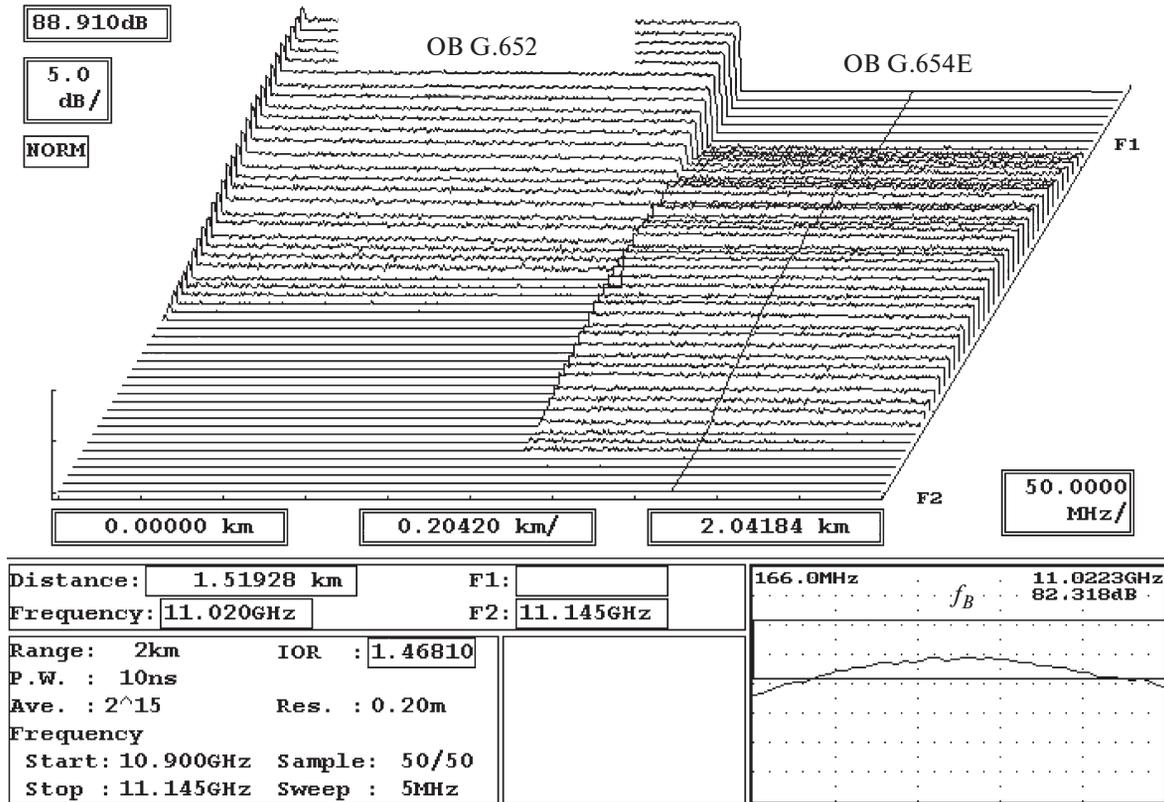


Рис. 3. Пространственное распределение спектров рассеяния МБ для OB G.654E.

тяжения (Strain), ширины спектров рассеяния МБ и профиля спектров рассеяния МБ, соответствующие 3D-рефлектограмме (полученной с помощью бриллюэновского оптического импульсного рефлектометра) распределения спектров рассеяния МБ, показанной на рис. 1, с указанием характерных участков и положения бриллюэновского частотного сдвига (f_B).

Величина бриллюэновского частотного сдвига у OB “DRAKA” составляет 10.75 ГГц (OB G.652, OB “ULTRA” и OB “LBL” были проанализированы в более ранних работах [2–4], данные о бриллюэновском частотном сдвиге для них приведены в табл. 1).

Согласно рекомендации МСЭ–Т, G.654 – OB со смещенной отсечкой (длиной волны отсечки (λ_{cut}), равной 1530 нм), оно предназначено для высокоскоростных наземных оптических сетей большой протяженности. Длина волны отсечки – это минимальная длина волны, устанавливающая границу для одномодового режима распространения световых волн (в OB распространяется только одна мода). Это OB имеет достаточно низкие потери на макроизгибе, улучшенные характеристики хроматической дисперсии для диапазона длин волн 1530–1625 нм, диапазон номинального диаметра модового поля и т. п.

На рис. 3 представлено пространственное распределение спектра рассеяния МБ для OB G.654E.

На рис. 4 для OB G.654E показана мультирефлектограмма, соответствующая зависимости пространственного распределения спектров рассеяния МБ на рис. 3.

Величина БЧС для G.654E при нормальных условиях оказалась выше всех исследованных ранее OB, она составляет 11.02 ГГц.

Пространственное распределение спектров рассеяния МБ для OB G.652 (1305), длина волны отсечки (λ_{cut}) которого составляет 1305 нм, представлено на рис. 5.

Величина БЧС для OB G.652 (1305) при нормальных условиях равна 10.78 ГГц.

На рис. 6 приведена зависимость распределения спектров рассеяния МБ по длине световода для OB G.652 (1235) с длиной волны отсечки (λ_{cut}), равной 1235 нм.

Для OB G.652 (1235) при нормальных условиях величина бриллюэновского частотного сдвига составляет 10.81 ГГц.

На рис. 7 представлено пространственное распределение спектра рассеяния МБ для OB G.657 (рекомендация МСЭ–Т G.657 – OB с повышен-

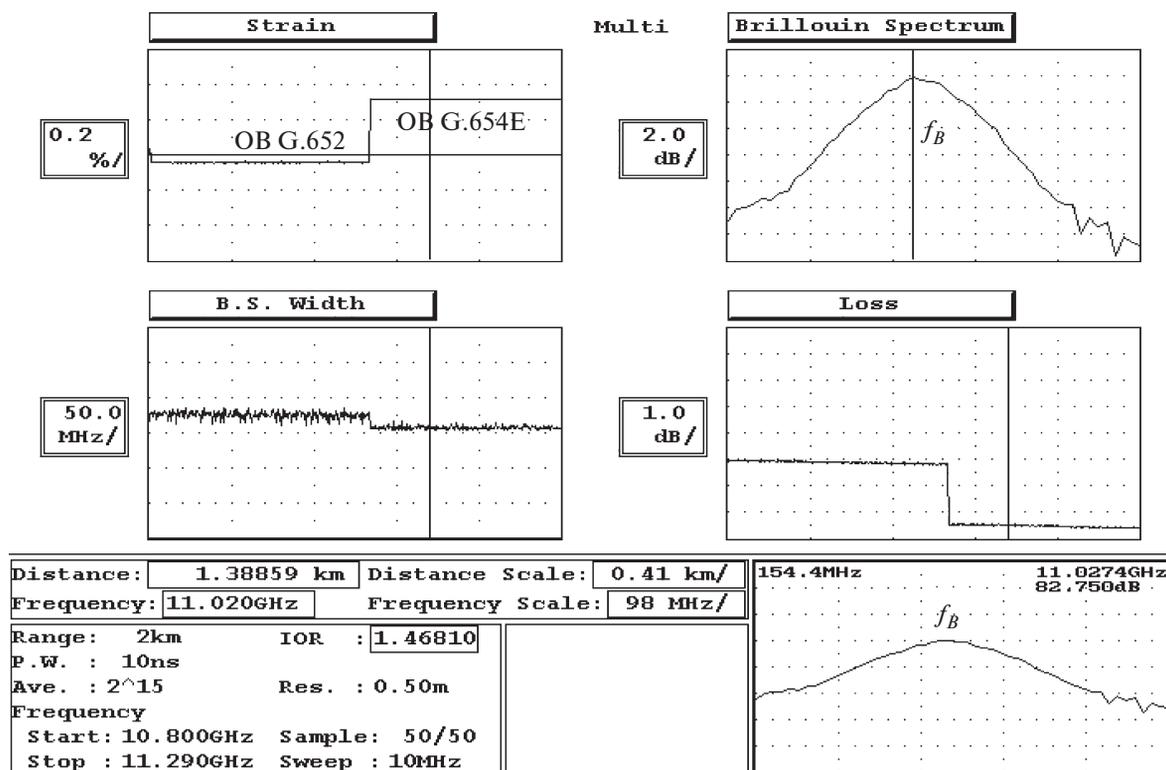


Рис. 4. Мультирефлектограмма для OB G.654E.

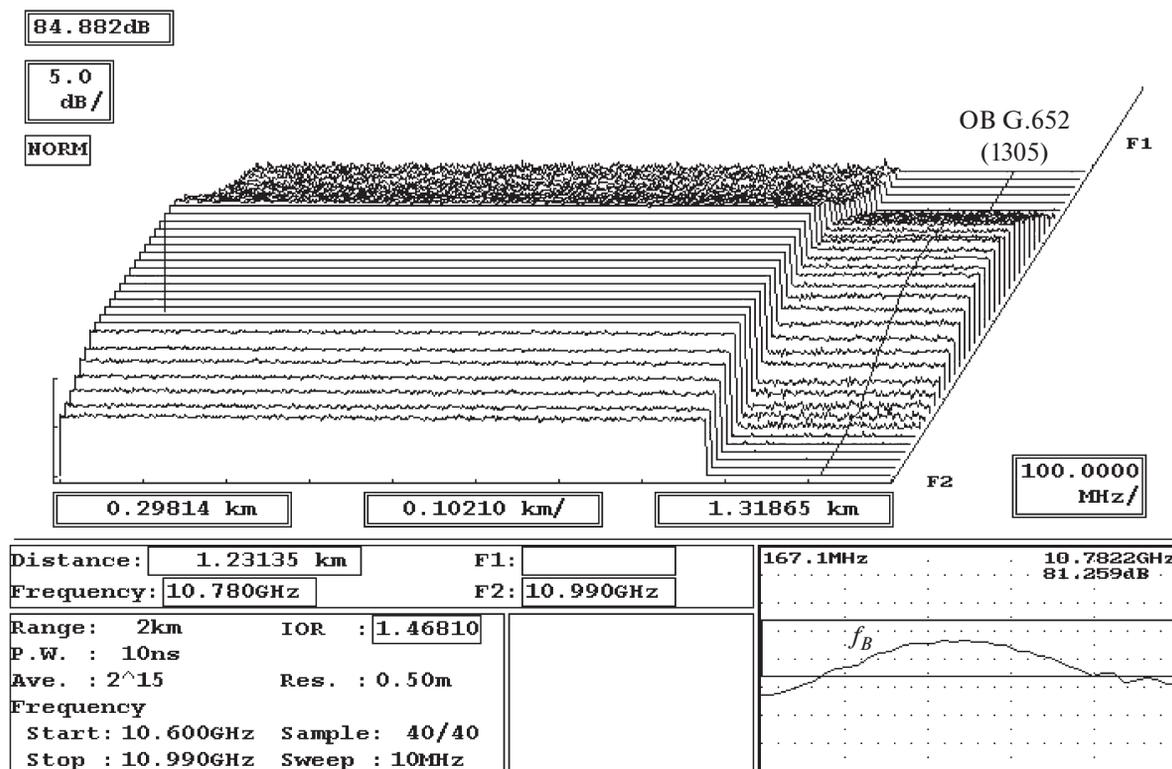


Рис. 5. Пространственное распределение спектров рассеяния МБ для OB G.652 ($\lambda_{cut} = 1305$ nm).

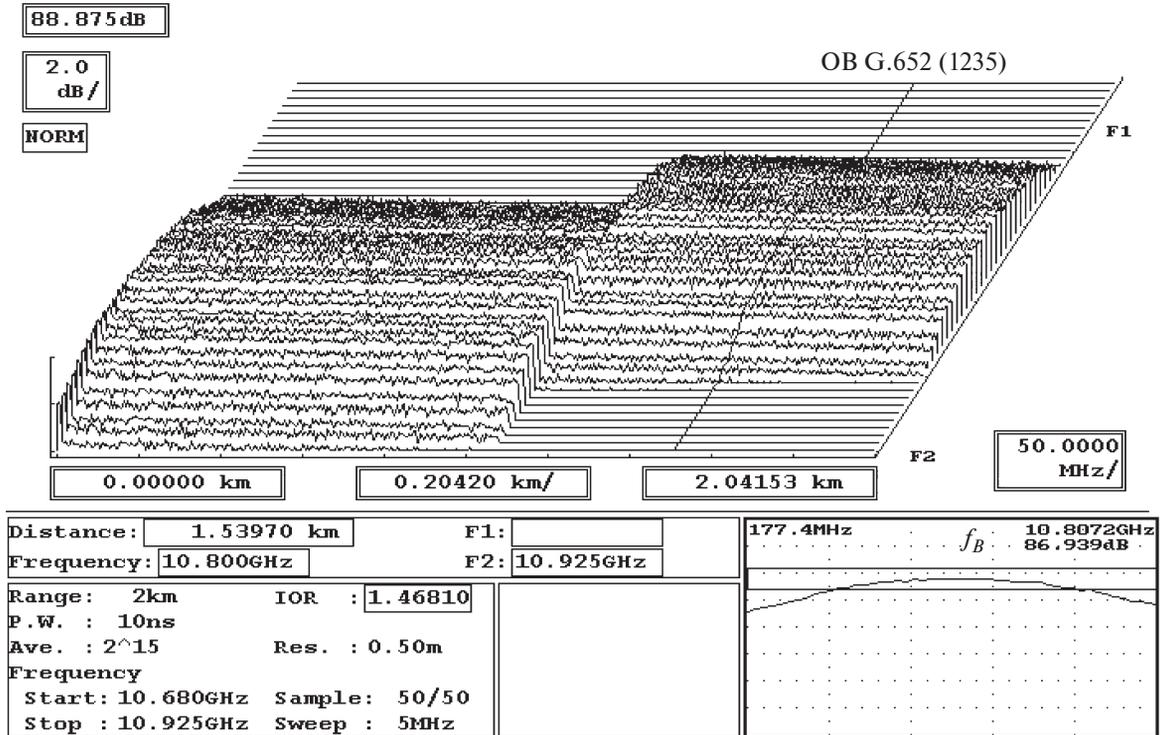


Рис. 6. Пространственное распределение спектров рассеяния МБ для ОВ G.652 ($\lambda_{cut} = 1235$ нм).

ной устойчивостью к изгибам, т. е. не чувствительное к потерям на изгибе).

При нормальных условиях величина бриллюэновского частотного сдвига для ОВ G.657 оказалась равной 10.69 ГГц.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Соединение отрезков нескольких изучаемых разновидностей ОВ в единый световод существенно увеличивает скорость получения итоговых результатов измерений. По итоговым общим зависимостям, полученным с помощью бриллюэновского оптического импульсного рефлектометра, можно наблюдать изменения спектров рассеяния МБ, определять бриллюэновский частотный сдвиг и изучать профили спектров рассеяния МБ различных типов ОВ, входящих в световод.

Изучение с помощью бриллюэновского рефлектометра особенностей поведения спектров рассеяния МБ в ОВ различных видов и производителей позволило установить начальные значения БЧС (f_{B0}) для всех исследованных разновидностях ОВ.

В табл. 1 сведены значения f_{B0} для проанализированных в этой работе типов ОВ (у них добавле-

на в обозначение буква “Н”), а также для многих других ранее проанализированных ОВ [1–20].

По рекомендуемым значениям БЧС из табл. 1 (f_{B0}) можно по формуле (1) определить эффективную скорость гипер акустической волны (v_{Aeff}) и эффективный показатель преломления среды распространения (n_{eff}):

$$f_B = 2f_L v_{Aeff} n_{eff} / c = 2v_{Aeff} n_{eff} / \lambda_L, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, f_L – частота, а λ_L – длина волны излучения лазера [1–4, 12–14].

Например, при $\lambda_L = 1.55$ мкм для ОВ G.654Е получаем $v_{Aeff} = 5.81$ км/с (при $n_{eff} = 1.47$) или $n_{eff} = 1.496$ (при $v_{Aeff} = 5.71$ км/с); а ОВ “DRAKA” – $v_{Aeff} = 5.67$ км/с (при $n_{eff} = 1.47$) или $n_{eff} = 1.459$ (при $v_{Aeff} = 5.71$ км/с).

5. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при наличии бриллюэновских рефлектограмм по величине бриллюэновского частотного сдвига и характеристикам частотного профиля спектров рассеяния МБ можно классифицировать разновидности ОВ в составе световодов и проложенных ОК.

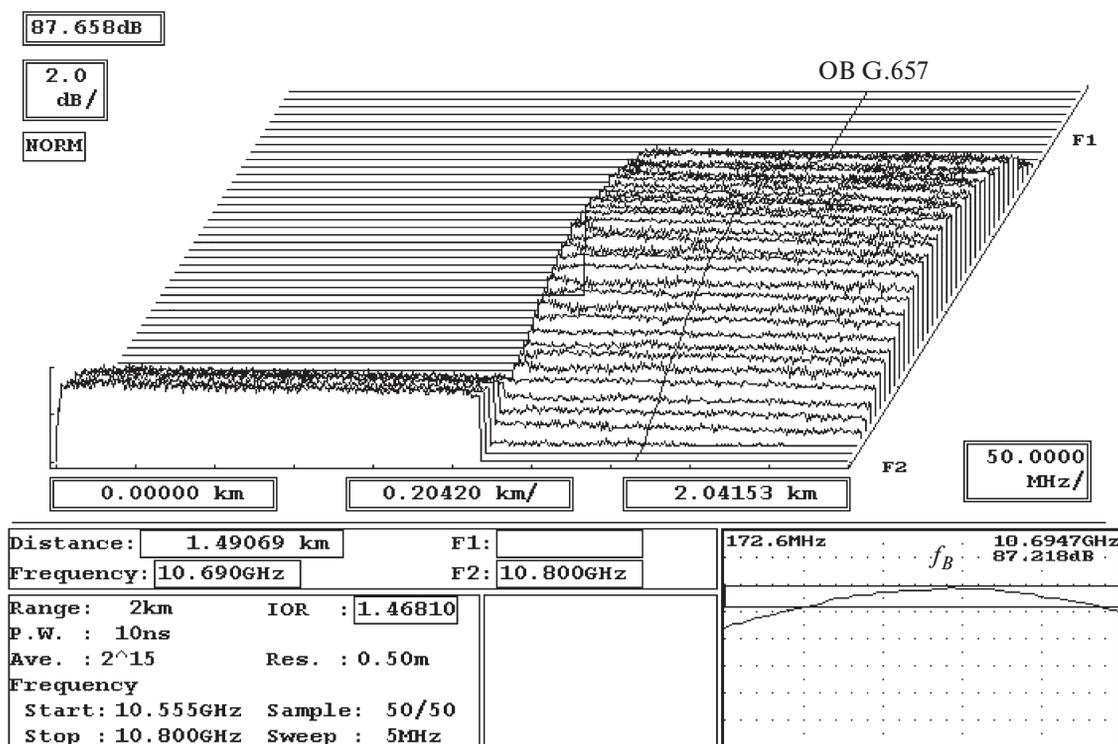


Рис. 7. Пространственное распределение спектров рассеяния МБ для ОВ G.657.

Различия в частотных характеристиках рассеяния МБ позволяют выявлять тип ОВ и классифицировать его разновидность.

Соединение в единый световод отрезков нескольких изучаемых ОВ позволяет по бриллюэновским рефлектограммам выделить различия характеристик рассеяния МБ и существенно повысить скорость получения итоговых результатов измерений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников ЗАО «Москабель–Фуджикура», АО «Оптиковолокonné системы» (Саранск) и Пермского федерального исследовательского центра за проявленный интерес к настоящей работе, за предоставленные для исследования образцы ОВ и содействие в проведении экспериментов с помощью бриллюэновского оптического импульсного рефлектометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bogachkov I.V. // J. Phys. 2018. V. 1015. P. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/2/022004>
2. Bogachkov I.V., Gorlov N.I. // J. Phys. 2022. V. 2182. P. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2182/1/012089>
3. Bogachkov I.V. // T-comm, 2019. V. 13. № 1. P. 60.
4. Bogachkov I.V., Gorlov N.I. // J. Phys. 2021. V. 1791. P. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1791/1/012039>
5. Bogachkov I.V., Trukhina A.I. Researches of Initial Value of the Brillouin Frequency Shift in Optical Fibers of Different Types // Systems of signals generating and processing in the field of onboard communications. Moscow. 2018. P. 1. <https://doi.org/10.1109/SOSG.2018.8350574>
6. Kobayakov A., Sauer M., Chowdhury D. // Adv. Optic. Photon. 2010. V. 2. P. 1.
7. Ruffin A.B., Li M.-J., Chen X., Kobayakov A., Annunziata F. // Opt. Lett., 2005. V. 30. P. 3123.
8. Gorlov N.I., Bogachkov I.V. An Analysis of the Influence of the Physical Layers Structure of Optical Fibers on the Mandelstam – Brillouin Scattering Characteristics // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO–2020). Kaliningrad. 2020. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166063>
9. Bogachkov I.V. Research Characteristics of the Mandelstam – Brillouin Scattering in Specialized Single-mode Optical Fibers // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics. Omsk. 2017. <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2017.8239436>
10. Liu X. Characterization of Brillouin scattering spectrum in LEAF fiber. University of Ottawa, 2011. 102 p.
11. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S., Sotobayashi H., Chujo W. // Lightwave Technol. 2004. V. 22. P. 631.
12. Dragic P.D. // J. Opt. Soc. Am. B. 2009. V. 26. P. 1614.
13. Law P.-C., Liu Y.-Sh., Croteau A., Dragic P.D. // Opt. Mater. Express. 2011. V. 1. P. 686.

14. *Zou W., He Z., Hotate K.* // Opt. Express. 2008. V. 16. P. 18804.
15. *Sikali Mamdem Y., Pheron X., Taillade F.* Two-dimensional FEM Analysis of Brillouin gain spectra in acoustic guiding and antiguiding single mode optical fibers // COMSOL Conference. Proceedings. Paris. 2010.
16. *Belokrylov M.E., Konstantinov Y.A., Latkin K.P., Claude D., Seleznev D.A., Stepin A.A., Konin Y.A., Shcherbakova V.A., Kashina R.R.* // Instruments Exp. Tech. 2020. V. 63. P. 48.
<https://doi.org/10.1134/S0020441220050012>
17. *Kim Y.H., Song K.Y.* // J. Lightwave Technol. 2015. V. 33. P. 4922.
18. *Yu Q., Bao X., Chen L.* // Opt. Lett. 2004. V. 29. P. 17.
19. *Burdin V.V., Konstantinov Y.A., Claude D., Latkin K.P., Belokrylov M.E., Krivosheev A.I., Tsibinogina M.K.* // Instruments Exp. Tech., 2021. V. 64. P. 768.
<https://doi.org/10.1134/S0020441221050031>
20. *Burdin V.V., Konstantinov Y.A., Pervadchuk V.P., Smirnov A.S.* // Quantum Electron. 2013. V. 43. P. 531.
<https://doi.org/10.1070/QE2013v043n06ABEH014995>