

УДК 535

А.С. Смирнов^{1, 2}, В.В. Бурдин^{1, 2}, Д.С. Власов¹, Ю.А. Константинов²

¹ Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

² Лаборатория фотоники Пермского научного центра
Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

О ПРИМЕНЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В СОХРАНЯЮЩЕМ ПОЛЯРИЗАЦИЮ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ ТЕМПЕРАТУРАХ

Рассматривается использование метода поляризационной рефлектометрии для контроля распределения наведенных поляризационных дефектов в катушке при различных установившихся температурах. Показан переход к количественной оценке распределенной связи поляризационных мод. Представлена корреляция между значениями h -параметра, измеренного стандартным методом, и значением, рассчитанным исходя из данных поляризационной рефлектометрии. Проведена оценка чувствительности метода к температуре.

Ключевые слова: сохраняющие поляризацию волокна, поляризационная рефлектометрия, экстинкция, h -параметр.

A.S. Smirnov^{1, 2}, V.V. Burdin^{1, 2}, D.S. Vlasov¹, Yu.A. Konstantinov²

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Photonics Laboratory of Perm Scientific Centre of Ural Branch
of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

ABOUT POLARIZATION-OPTICAL TIME DOMAIN REFLECTOMETRY APPLICATION IN POLARIZATION-MAINTAINING FIBER AT DIFFERENT ESTABLISHED TEMPERATURES

The paper discussed the use of polarization-optical time domain reflectometry as a method for measuring the induced polarization defects distribution in polarization-maintaining fiber coil at different established temperatures. It was shown the transition to quantify estimating the polarization defects distribution. It was provided the correlation between the values of h -parameter measured by the standard method, and the value calculated from the polarization reflectometry data. The estimation of method sensitivity to temperature was done.

Keywords: polarization-maintaining fiber, polarization-optical time domain reflectometry, OTDR, polarization extinction, h -parameter.

Введение

Анизотропные оптические волокна [1] широко применяются как чувствительные элементы волоконных интерферометрических датчиков, в которых необходима высокая степень сохранения состояния линейной поляризации излучения. В поперечном сечении таких световодов существуют два взаимно перпендикулярных конструктивно выделенных направления: быстрая и медленная оси. Излучение, поляризованное вдоль этих направлений, распространяется с различными скоростями. Таким образом, анизотропные световоды имеют две поляризационные взаимно ортогональные моды. Если изначально ввести линейно-поляризованное излучение только в одну поляризационную моду, то по мере его распространения по световоду малая часть мощности неизбежно будет переходить в ортогональную поляризационную моду.

Связь поляризационных мод характеризуется h -параметром – величиной относительной доли мощности излучения, перекачиваемого из одной моды в ортогональную на участке световода длиной 1 м. Величина h -параметра является важнейшей характеристикой анизотропных волоконных световодов, в значительной степени определяющей класс точности волоконных датчиков. Для суждения о качестве анизотропного световода важно определить не только средние и интегральные характеристики, такие как коэффициент двулучепреломления [2], поляризационные потери или среднее значение h -параметра, но и распределенную вдоль длины световода связь поляризационных мод, в том числе при различных температурах.

Одним из известных методов определения распределенной связи мод является метод низкокогерентной интерферометрии [3]. В работах [4–6] для определения локализации областей перекачки мощности из одной поляризационной моды в другую (поляризационных дефектов) и определения величины связи поляризационных мод был предложен метод поляризационной рефлектометрии. Этот метод, по сравнению с методом низкокогерентной интерферометрии, имеет меньшую чувствительность и пространственную разрешающую способность, однако у него есть преимущество в цене и доступности оборудования.

В настоящей работе были исследованы поляризационные дефекты в образцах анизотропного волоконного световода при различных установившихся температурах методом поляризационной рефлектометрии. Была также дана оценка чувствительности рассматриваемого

метода при температурных изменениях. Для наблюдения «усиленного» эффекта возникновения наведенных поляризационных дефектов были выбраны образцы с большой связью поляризационных мод, в которых поляризационная экстинкция существенно изменялась при изменении температуры.

1. Установка и метод

В методе поляризационной рефлектометрии [4–6] последовательно рассматриваются поляризационные рефлектограммы двух типов: получаемые при одинаковом возбуждении обеих поляризационных мод волокна и получаемые при возбуждении только одной поляризационной моды волокна (рис. 1). Отметим, что во всех опытах излучение, регистрируемое приемником рефлектометра, проходило через поляризатор дважды: в прямом направлении при входе в анизотропный световод и в обратном (рис. 2).

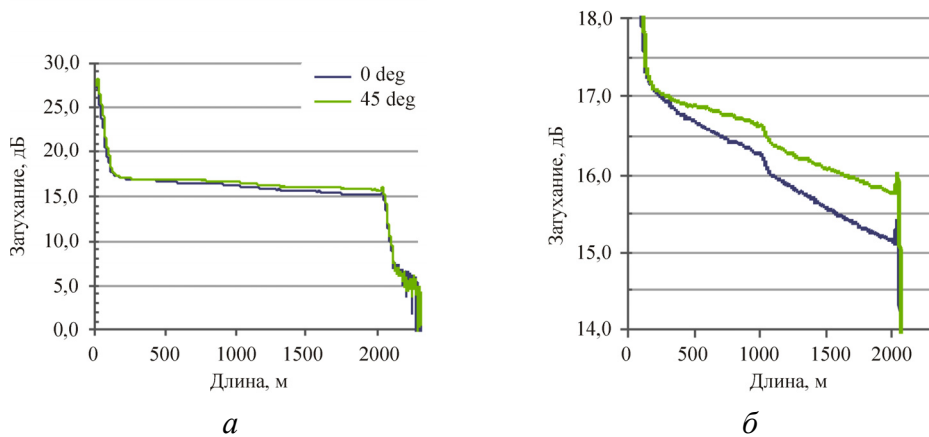


Рис. 1. Пример рефлектограмм первого и второго типов, соответствующих поляризации света под углами 45° и 0° к поляризационным осям световода: *а* – общий вид; *б* – укрупненный масштаб интересующей области

Одинаковое возбуждение поляризационных мод достигается при введении линейно-поляризованного излучения под углом 45° к поляризационным осям анизотропного световода (в случае использования поляризатора с волоконными выводами достаточно произвести сварку под углом 45°). При этом рефлектограмма первого типа представляет собой простое затухание поляризационных мод вдоль волокна, не свя-

занное с перекачкой интенсивности между поляризационными модами. Если же в световод ввести линейно-поляризованное излучение под углом 0° к поляризационной оси анизотропного волокна (произвести сварку под углом 0°), то отраженное назад излучение, перешедшее в ортогональную поляризационную моду, полностью поглощается поляризатором.

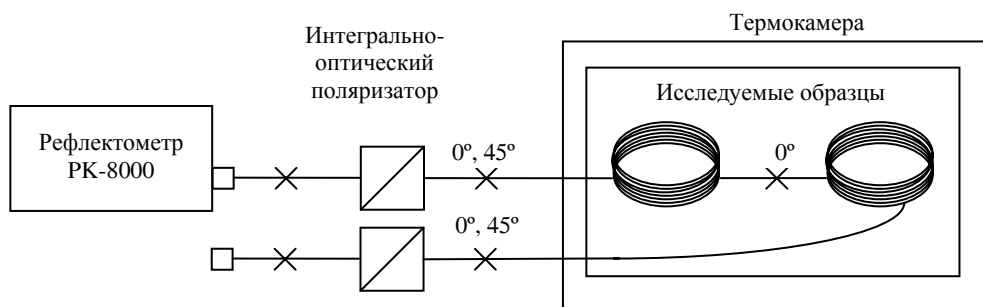


Рис. 2. Схема установки

Рефлектограмма второго типа представляет собой затухание поляризационной моды и затухание, связанное с перекачкой мощности в ортогональную моду вдоль волокна. Вследствие этого на рефлектограмме второго типа регистрируется большее затухание (см. рис. 1).

Разность рефлектограмм первого и второго типов можно трактовать как затухание, обусловленное переходом мощности излучения между поляризационными модами. В [6] было показано, что определяемое методом поляризационной рефлектометрии поляризационное затухание в образце волокна позволяет получить оценку величин поляризационной экстинкции и h -параметра, которые интегрально характеризуют свойство волоконного световода сохранять вводимое линейно-поляризованное состояние излучения.

В настоящей работе, по сравнению с предыдущими [4–6], использовалась несколько измененная схема установки (см. рис. 2). Для соединения образцов анизотропных оптических волокон применялся автоматизированный сварочный аппарат Fujikura FSM-100P, позволяющий осуществлять сваривание анизотропных волокон с задаваемым взаимным углом между поляризационными осями образцов. Применение автоматизированного аппарата позволило уменьшить потери на сварках в измеряемой линии суммарно примерно на 2 дБ по

сравнению с применяемым ранее [4–6] ручным сварочным аппаратом. Выбранные для исследования катушки сваривались друг с другом с ориентацией под 0° . Параметры элементов схемы: величина поляризационной экстинкции поляризаторов на подложке из ниобата лития с волоконными выводами (производство АО «ПНППК») – 32 дБ, 30 дБ; оценка поляризационной экстинкции сварных соединений – 28 дБ (множественные измерения поляризационной экстинкции сварных соединений, сделанных с сохранением осей поляризации, по встроенному в сварочный аппарат алгоритму); динамический диапазон рефлектометра – 30 дБ; используемая длина импульса – 20 м.

Измерения поляризационных рефлектограмм проводились при температурах 20, 60, -40 , -60 °С после полуторачасового выдерживания на каждой температурной позиции с двух концов симметричной схемы. Производились два термоцикла: сначала со схемой для рефлектограмм первого типа, затем такой же цикл со схемой для рефлектограмм второго типа.

2. Результаты и обсуждение

В начале волоконной линии (0–250 м) на рефлектограммах (см. рис. 1) наблюдается спад интенсивности, вызванный размещенным в начале линии поляризатором, с вносимым затуханием порядка 10 дБ (мертвая зона по затуханию [7]). В результате на всех последующих зависимостях первые 250 м не информативны. На рис. 3 приведены разности рефлектограмм первого и второго типов, которые соответствуют перекачке мощности из основной поляризационной моды в ортогональную, которую сокращенно будем называть поляризационным затуханием.

На графиках поляризационного затухания (рис. 3) на длине линии ≈ 1050 м наблюдается скачок, связанный с точечным дефектом – сварным соединением образцов. Ярче всего он выражен на графике, соответствующем температуре 60 °С. В первом образце и на сварном соединении часть мощности перекачивается в ортогональную моду, следовательно, во втором образце может не выполняться с достаточной точностью условие возбуждения только одной поляризационной моды, необходимое для оценки h -параметра. В дальнейшем мы учли этот факт и рассматривали образцы по отдельности в экспериментах, в которых они находились в начале линии (рис. 4, а, б).

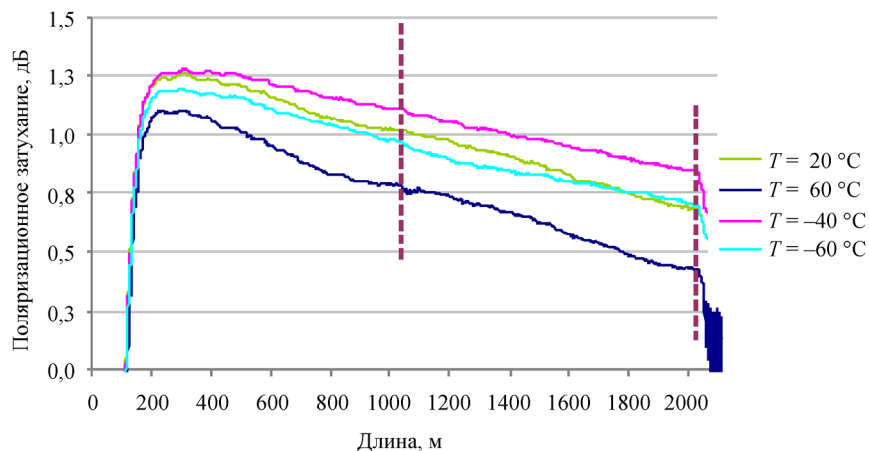


Рис. 3. График поляризационного затухания для линии из двух образцов при четырех различных температурах (пунктиром обозначена граница образцов)

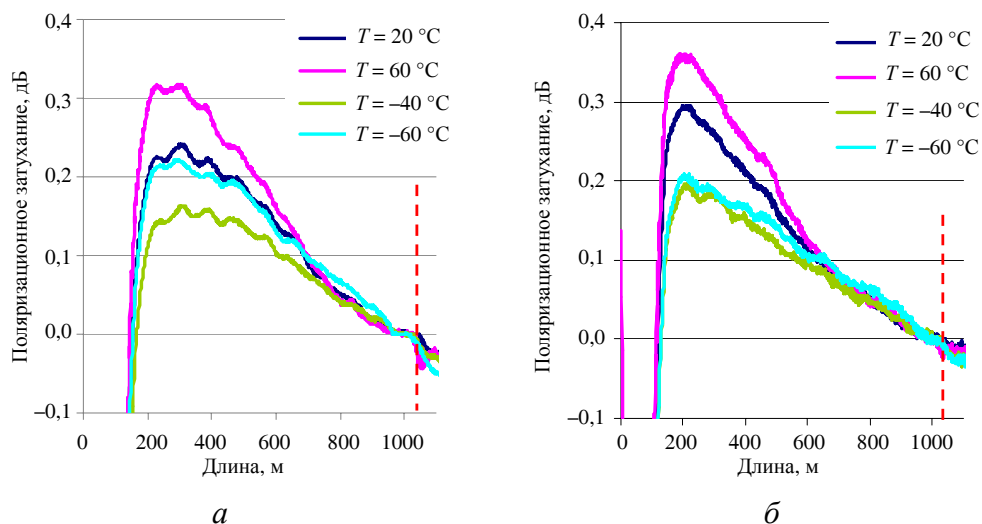


Рис. 4. Поляризационные затухания линии из двух образцов (*а* – 1, *б* – 2) по отдельности при четырех различных температурах (пунктиром обозначена граница образцов)

Исходные рефлектограммы несут в себе информацию о затухании в линии с точностью до некоторой постоянной. При разных условиях ввода излучения уровень рефлектограмм различен, но «кривизна» затухания сохраняется. Графики поляризационного затухания, являясь разностями рефлектограмм, обладают аналогичным свойством.

Графики поляризационного затухания (см. рис. 4, а, б) были смещены вдоль вертикальной оси (по шкале затухания) таким образом, чтобы они сходились в одной точке на конце волоконного образца, соответствующей нулевому уровню по шкале затухания. Такое смещение графиков позволяет наглядно оценивать поляризационное затухание при различных температурах. Например, при температуре 60 °С поляризационное затухание для первого образца соответствует максимуму графика, т.е. примерно 0,3 дБ (см. рис. 4, а), а для второго образца – примерно 0,36 дБ (см. рис. 4, б).

Графики поляризационного затухания на рис. 4 позволяют перейти к количественным оценкам величины h -параметра образцов. В работе [6] получена оценочная формула, связывающая величину поляризационного затухания с величиной h -параметра:

$$h = \frac{1}{2L} \ln \left(2 \cdot 10^{\frac{-\Delta\alpha}{10}} - 1 \right)^{-1},$$

где $\Delta\alpha$ – величина поляризационного затухания, выраженная в дБ; L – длина образца.

В таблице приведены результаты оценки величины h -параметра, полученные исходя из данных поляризационной рефлектометрии, а также данные h -параметра, измеренные стандартным методом [3].

Измеренные и рассчитанные характеристики сохранения поляризации второй намотки

Образец	Температура, °С	Поляризационное затухание, дБ	h -параметр, определенный стандартным методом [3], 10^{-5} м^{-1}	h -параметр, рассчитанный из величины поляризационного затухания Da , 10^{-5} м^{-1}
1	60	0,30	5,7	7,2
	20	0,24	3,7	5,7
	-40	0,16	2,0	3,8
	-60	0,21	2,2	5,1
2	60	0,36	2,4	8,6
	20	0,29	1,9	6,8
	-40	0,19	1,4	4,4
	-60	0,20	1,8	4,8

Судя по данным таблицы, при различных температурах наблюдается достаточная корреляция между значениями h -параметра, полученными разными способами (коэффициенты корреляции для первого и второго образцов соответственно 0,95 и 0,93). Рассчитываемый по рассматриваемому методу h -параметр превышает величину h -параметра, определенного стандартным методом [3], тем не менее характер зависимости от температуры сохраняется (рис. 5).

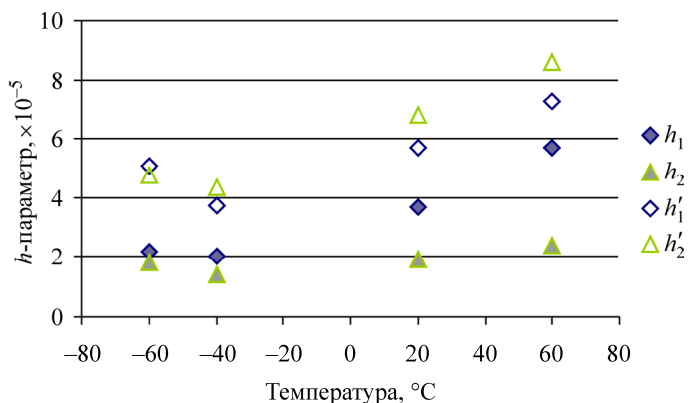


Рис. 5. Зависимости значений h -параметра двух образцов при различных температурах: h_1, h_2 определены стандартным методом; h'_1, h'_2 рассчитаны из величины поляризационного затухания

Значения h -параметра, рассчитанные исходя из величины $\Delta\alpha$, регистрируемой рефлектометром на основании обратно рассеянного излучения, превышают значения h -параметра, полученные стандартным методом [3]. Это свидетельствует о том, что отраженное назад излучение содержит большую долю мощности в «невозбужденной» поляризационной моде по сравнению со случаем распространения излучения по световоду в прямом направлении (в стандартном методе [3] измерения h -параметра). Возможно, перераспределение интенсивности по поляризационным модам в обратно рассеянном излучении связано с дефектами, имеющими френелевскую природу. Таким образом, при отражении излучения от различных неоднородностей часть мощности из одной поляризационной моды переходит в ортогональную поляризационную моду, хотя в целом излучение остается преимущественно в изначально возбужденной поляризационной моде.

Оценим чувствительность рассматриваемого метода к температуре. На рис. 6 приведены зависимости наблюдаемых поляризационных затуханий в зависимости от температуры. В качестве наблюдаемой погрешности измерений примем величину «толщины» линии поляризационного затухания, которая на рис. 3–4 составляет примерно 0,01 дБ.

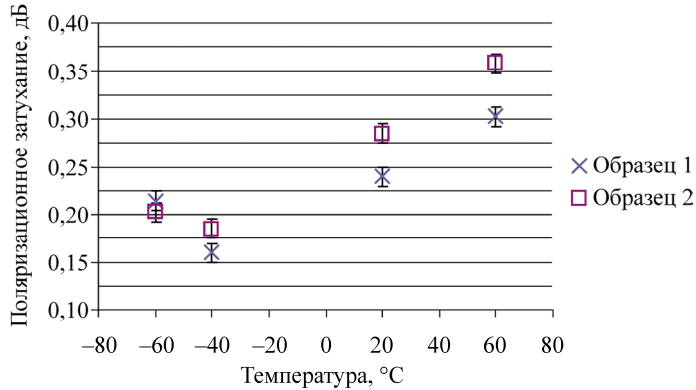


Рис. 6. Зависимости наблюдаемых поляризационных затуханий от температуры

Коэффициент чувствительности метода можно определить как производную поляризационного затухания по температуре. Если в диапазоне от -40 до 60 °C зависимость поляризационного затухания от температуры считать приблизительно линейной, то коэффициенты, определяющие чувствительность, будут равны:

$$k_1 = \frac{0,30 - 0,16}{60 - (-40)} = 0,0014 \frac{\text{дБ}}{^\circ\text{C}}; \quad k_2 = \frac{0,36 - 0,19}{60 - (-40)} = 0,0017 \frac{\text{дБ}}{^\circ\text{C}};$$

$$k_{\text{средн}} \approx 0,00155 \frac{\text{дБ}}{^\circ\text{C}}.$$

Таким образом, исходя из погрешности измерений 0,01 дБ чувствительность метода к температуре составляет величину $0,01 \text{ дБ} / 0,00155 \frac{\text{дБ}}{^\circ\text{C}} \approx 6$ °C.

Выводы

В работе проведено исследование зависимости распределенной связи поляризационных мод анизотропных волоконных образцов от температуры методом поляризационной рефлектометрии. Показан пе-

реход к количественной оценке распределенной связи поляризационных мод. Представлена корреляция между значениями h -параметра, измеренного стандартным методом [3], и значением, рассчитанным исходя из данных поляризационной рефлектометрии. Проведена оценка чувствительности метода к температуре.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Пермского края и Пермской научно-производственной приборостроительной компании в рамках научного проекта № 14-42-08009 р_офи_м.

Список литературы

1. Труфанов А.Н., Труфанов Н.А. О моделях формирования напряженного состояния в анизотропных оптических волокнах // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 97–111.
2. Петухов А.С., Смирнов А.С., Бурдин В.В. Температурные свойства волоконной четвертьволновой пластинки минимальной длины // Фотон-Экспресс-Наука. – 2015. – № 6 (126).
3. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. – Artech House Optoelectronics Library, 1993.
4. Детектирование и локализация дефектов сохранения поляризации в анизотропном волоконном световоде / В.В. Бурдин, Ю.А. Константинов, В.П. Первадчук, А.С. Смирнов // Квантовая электроника. – 2013. – № 43. – С. 531–534.
5. Рефлектометрический метод оценки взаимодействия поляризационных мод в анизотропных оптических волокнах / В.В. Бурдин, Ю.А. Константинов, В.П. Первадчук, А.С. Смирнов // Фотон-Экспресс-Наука. – 2013. – № 6.
6. Смирнов А.С., Бурдин В.В., Константинов Ю.А. Об оценке h -параметра в сохраняющем поляризацию оптическом волокне на основе данных поляризационной рефлектометрии // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 97–111.
7. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпарт, 2005. – 208 с.

References

1. Trufanov A.N., Trufanov N.A. O modeliakh formirovaniia napriazhennogo sostoianiia v anizotropnykh opticheskikh voloknakh [About the

models of intensive condition's formation in anisotropic optical fibers]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 97-111.

2. Petukhov A.S., Smirnov A.S., Burdin V.V. Temperaturnye svoistva volokonnoi chetvert'volnvoi plastinki minimal'noi dliny [Temperature conditions of the fiber quarter-wave plate with minimum length]. *Foton-Ekspress-Nauka*, 2015, no. 6 (126).

3. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. Artech House Optoelectronics Library, 1993.

4. Burdin V.V., Konstantinov Iu.A., Pervadchuk V.P., Smirnov A.S. Detektirovanie i lokalizatsiia defektov sokhraneniia poliarizatsii v anizotropnom volokonnom svetovode [Detection and localization of the defects with preservation of polarization in anisotropic optical fiber]. *Kvantovaia elektronika*, 2013, no. 43, pp. 531-534.

5. Burdin V.V., Konstantinov Iu.A., Pervadchuk V.P., Smirnov A.S. Reflektometricheskii metod otsenki vzaimodeistviia poliarizatsionnykh mod v anizotropnykh opticheskikh voloknakh [Reflectometry method for measuring the interaction of polarization modes in anisotropic optical fibers]. *Foton-Ekspress-Nauka*, 2013, no. 6.

6. Smirnov A.S., Burdin V.V., Konstantinov Iu.A. Ob otsenke h-parametra v sokhraniushchem poliarizatsiiu opticheskom volokne na osnove dannykh poliarizatsionnoi reflektometrii [About an estimate of the h-parameter in the polarization maintaining optical fiber based on polarization reflectometry data]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 51-57.

7. Listvin A.V., Listvin V.N. Reflektometriia opticheskikh volokon [Reflectometry of optical fibers]. Moscow, 2005. 208 p.

Получено 1.11.2015