

УДК 535.3

И.Д. Мосунова¹, Д.А. Селезнёв¹, М.В. Ременникова²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

² Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОПУСКАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПРИ МАЛЫХ ИЗГИБАХ

Проведено экспериментальное исследование и продемонстрирована математическая модель влияния изгибов на спектральное пропускание одномодового оптического волокна. На основе полученных данных подтверждена теория о том, что в волокне между основной распространяющейся модой и оболочечной модой возникает разность хода, и в результате их интерференции наблюдается как усиление, так и ослабление мощности излучения.

Ключевые слова: изгибные потери, одномодовое оптическое волокно, интерференция мод.

I.D. Mosunova¹, D.A. Seleznev¹, M.V. Remennikova²

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Perm Federal Research Center UB RAS, Perm, Russian Federation

RESEARCH OF THE SPECTRAL TRANSMITTANCE OF OPTICAL FIBERS AT SMALL BENDS

An experimental study was conducted and a mathematical model of the effect of single-mode optical fiber bends on the signal spectrum was demonstrated. Based on the data obtained, the theory was confirmed that a difference in the course occurs in the fiber between the main propagating mode and the shell mode, and as a result of their interference, both amplification and weakening of the radiation power are observed.

Keywords: bending losses, single-mode optical fiber, interference mode.

Введение

Развитие разных сфер применения одномодовых оптических волокон (ОВ) приводит к изменению условий их укладки. Из-за всеобщей тенденции к уменьшению размеров современных устройств появляется потребность в укладке волокна в малые замкнутые объемы. Кроме того, могут возникнуть и случайные ошибки при монтаже, которые приводят к тому, что отрезки волокон подвергаются изгибам

со значительно меньшим радиусом, чем предусмотрено производителем, в результате чего может теряться большая часть мощности излучения, а также искажаться сигнал из-за возникновения «паразитных» эффектов.

Любые изгибы ОВ приводят к увеличению затухания, обусловленного выходом части мощности направляемых мод в оболочку ОВ [1]. Затухание резко возрастает, когда радиус петли приближается к критическому радиусу, как это видно из формулы:

$$\alpha = \exp\left(\frac{R}{R_c}\right), \quad (1)$$

где α – потери при изгибе, R – радиус изгиба, R_c – критический радиус изгиба, определяемый как

$$R_c = \frac{a}{(\text{NA})^2}, \quad (2)$$

где a – радиус сердцевины, NA – числовая апертура ОВ [2]. Критический радиус изгиба зависит от разности показателей преломления между сердцевиной и оболочкой, длины волны и от геометрии волокна.

Потери при изгибе волокна возникают по двум причинам. Во-первых, из-за смещения модового пятна изогнутого участка волокна в месте его соединения с прямым участком (потери из-за рассогласования модовых пятен). Во-вторых, мощность теряется и непосредственно в изогнутом волокне из-за излучения в оболочку (излучательные изгибные потери) [3].

Спектры потерь в изогнутых и в «прямых» волокнах могут существенно различаться. Так, например, в «прямых» волокнах потери на $\lambda = 1550$ нм меньше, чем на $\lambda = 1310$ нм. В то же время потери, вносимые при изгибе волокна, на $\lambda = 1550$ нм больше, чем на $\lambda = 1310$ нм [4].

При измерении потерь, вызванных изгибом волокна сверх допустимого радиуса (для стандартного одномодового волокна – порядка 50 мм), вторичный эффект, возникающий вследствие интерференции между основной распространяющейся модой в сердцевине и оболочечными модами, может появляться, если длина изогнутого образца не является достаточной для подавления оболочечных мод. При данном эффекте распространяющийся оптический сигнал выходит из сердцевины изогнутого волокна и отражается обратно от искривленных гра-

ниц раздела сред за пределами сердцевин (например, сердцевина-оболочка или оболочка-покрытие, или покрытие-воздух), при этом интерферируя с основной распространяющейся модой. Появляется интерферометр наподобие интерферометра Маха-Цендера. Таким образом, между основной распространяющейся модой и оболочечной модой возникает разность хода, и в результате их интерференции может наблюдаться как усиление, так и ослабление мощности излучения. При определенных условиях расположения волокна в нем могут возникать конструктивные и деструктивные эффекты, приводящие к потерям, зависящим от значения длины волны при определенном радиусе изгиба. Схожее поведение можно наблюдать в случае фиксированного значения длины волны для изменяющегося значения радиуса и/или для изменяющейся температуры [5].

Цель данной работы – математическое моделирование и экспериментальное исследование зависимости влияния изгибных потерь на спектральное пропускание сигнала.

1. Экспериментальная часть

Проводились измерения мощности выходного излучения для длин волн в диапазоне 1500–1600 нм для изгибоустойчивого одномодового волокна SMF 28e+ при диаметрах изгиба 15, 17 и 20 мм. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

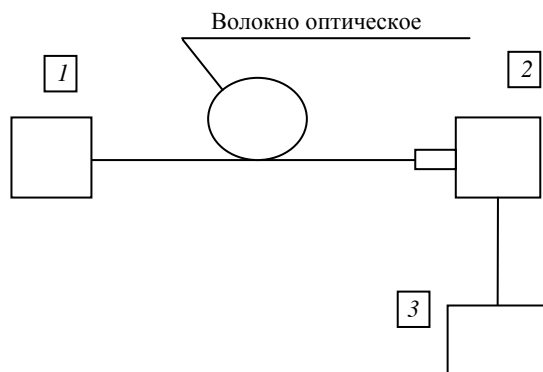


Рис. 1. Функциональная схема установки: 1 – источник белого света; 2 – оптический анализатор спектра; 3 – ПК

На рис. 2 представлена зависимость потерь в ОВ на изгибе от длины волны. Потери рассчитывались по формуле

$$\alpha = 1 - \frac{P_1}{P_2}, \quad (3)$$

где P_1 – выходная мощность излучения на изогнутом ОВ, а P_2 – на прямом ОВ.

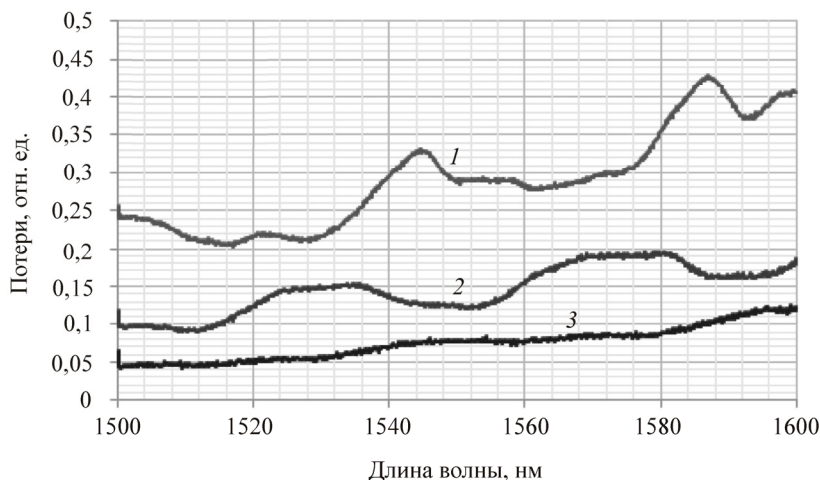


Рис. 2. Зависимость потерь при изгибе волокна от длины волны:
1 – 15 мм; 2 – 17 мм; 3 – 20 мм

При уменьшении радиуса изгиба возрастают потери мощности излучения и искажается спектральное пропускание сигнала. Между основной и оболочечными модами появляется разность хода, и в результате их интерференции на рис. 2 можно наблюдать усиление и ослабление мощности излучения. Также можно отметить наличие и дополнительных минимумов.

Результирующая интенсивность двух мод на выходе определяется следующей формулой:

$$I(\Delta\varphi) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi, \quad (4)$$

где I_1 – интенсивность излучения основной моды, I_2 – интенсивность излучения оболочечной моды, $\Delta\varphi$ – разность фаз между модами.

Выходная интенсивность зависит от разности фаз, которая, в свою очередь, зависит от длины волны:

$$\Delta\varphi(\lambda) = \frac{2\pi\Delta L n}{\lambda}, \quad (5)$$

где ΔL – разность хода между основной и оболочечной модами; n – среднее значение показателя преломления, $n = 1,48$; λ – длина волны излучения.

Максимум интенсивности будет наблюдаться при

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi, \quad (6)$$

где

$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{2\pi\Delta Ln}{\lambda_1}, \\ \varphi_2 = \varphi_1 + 2\pi = \frac{2\pi\Delta Ln}{\lambda_1 + \Delta\lambda}. \end{cases}$$

Таким образом, по формулам (5) и (6) была оценена разность хода между основной и оболочечной модами при $\lambda_1 = 1550$ нм и $\Delta\lambda = 40$ нм:

$$2\pi = 2\pi\Delta Ln \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_1 + \Delta\lambda} \right);$$

$$\Delta L = \frac{1}{n \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_1 + \Delta\lambda} \right)};$$

$$\Delta L = 40 \text{ мкм.}$$

2. Математическое моделирование

С помощью среды для моделирования COMSOL Multiphysics была реализована модель изгибных потерь при диаметре изгиба 17 мм. Входные параметры модели задавались вручную, характеристики волокна взяты из спецификации производителя. При вычислении траектории лучей и мощности на торце оптического волокна модель опиралась на формулы Френеля для прошедших и отраженных волн [6]. На рис. 3 продемонстрирована траектория излучения в изгибе. Из рис. 3 видно возникновение оболочечных мод.

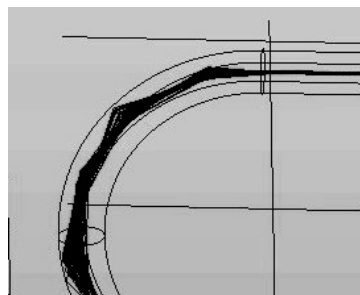


Рис. 3. Модель изгиба оптического волокна

чечных мод и, как следствие, отставание лучей и возникновение интерферометра.

В представленной модели вычислялась интегральная мощность, аккумулируемая на торце волокна для длин волн в диапазоне 1500–1600 нм. Диаметр изгиба составил 17 мм. Результаты представлены на рис. 4.

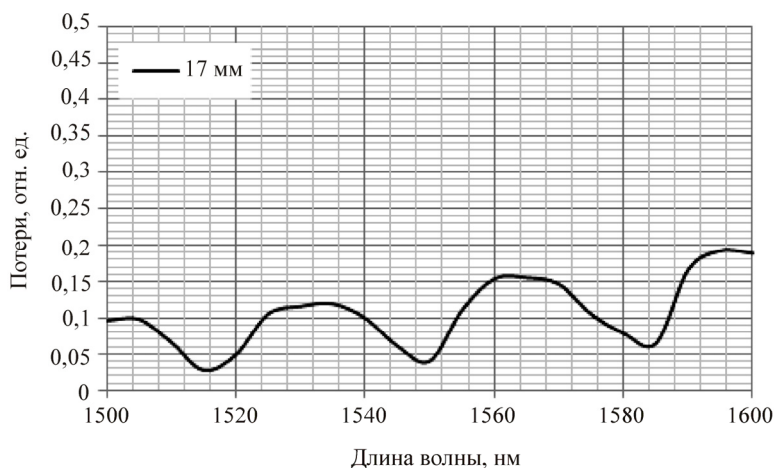


Рис. 4. Модель зависимости потерь при изгибе волокна от длины волны

При сравнении результатов эксперимента (см. рис. 2) и результатов моделирования (рис. 4) наблюдается гармоническая функция. Потери увеличиваются с увеличением длины волны. Частота смоделированного сигнала выше частоты, полученной в эксперименте. Можно предположить, что это связано с более сложной структурой реальных объектов.

Заключение

В ходе исследований было экспериментально подтверждено влияние малых изгибов на спектральное пропускание оптического волокна. Из-за появления оболочечных мод возникает разность фаз излучения и, как следствие, интерференция. Данный эффект должен учитываться при применении широкополосных источников излучения, так как при изгибах возникает неравномерное спектральное пропускание, и это может исказить исходный спектр. Эксперимент верифицирован математической моделью, но имеет различия из-за сложности реальных объектов и воздействий.

Список литературы

1. Былина М.С., Халилов М.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование потерь в изогнутых оптических волокнах // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3, № 2.
2. Бурков В.Д. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники: учеб. пособие. – М., 2007. – 222 с.
3. Механизмы потерь в одномодовых волоконно-оптических линиях связи: учеб. пособие / А.Б. Васильев [и др.]. – М., 2016. – 43 с.
4. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон: учеб. пособие. – М., 2005. – 208 с.
5. ГОСТ Р МЭК 60793-1-47-2014. Волокна оптические. Ч. 1–47. Методы измерений и проведение испытаний. Потери, вызванные макроизгибами. (Введ. 2015-03-03). – М., 2015. – 12 с.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М., 1985. – Т. 4. – 744 с.

References

1. Bylina M.S., Khalilov M.N. Teoreticheskoe i eksperimentalnoe issledovanie poter v izognutykh opticheskix voloknax. Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi [Theoretical and experimental study of losses in curved optical fibers. Works of communication educational institutions], 2017, vol. 3, no. 2.
2. Burkov V.D. Fiziko-texnologicheskie osnovy volokonno-opticheskoy texniki [Physical and technological foundations of fiber-optic technology]. Moscow, 2007, 222 p.
3. Vasilev A.B. et al. Mexanizmy poter v odnomodovykh volokonno-opticheskix liniyax svyazi [Loss mechanisms in single-mode fiber-optic communication lines]. Moscow, 2016, 43 p.
4. Listvin A.V., Listvin V.N. Reflektometriya opticheskix volokon [Reflectometry of optical fibers]. Moscow, 2005. 208 p.
5. GOST R MEK 60793-1-47-2014. Volokna opticheskie. Chast 1-47. Metody izmereniy i provedenie ispytaniy. Potery, vyzvannie makroizgibami [Optical fibers. Part 1-47. Measurement methods and testing. Macrobend losses]. Introduction 2015-03-03. Moscow, 2015, 12 p.
6. Sivuxin D.V. Obschiy kurs fiziki. Optika [General course of physics. Optics]. Moscow, 1985, vol. 4, 744 p.