

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ИЗОГНУТЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

М.С. Былина^{1*}, М.Н. Халилов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: BylinaMaria@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.372.8

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Былина М.С., Халилов М.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование потерь в изогнутых оптических волокнах // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 51–59.

Аннотация: В статье рассмотрена методика расчета коэффициента затухания изогнутого участка слабонаправляющего оптического волокна круглого поперечного сечения со ступенчатым профилем показателя преломления, основанная на расчете распределений напряженностей электрических и магнитных полей направляемых мод. Представлены результаты расчетов зависимостей коэффициентов затухания различных волокон от радиуса изгиба. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: оптическое волокно, мода, одномодовое волокно, изгибные потери, коэффициент затухания.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF LOSS IN OPTICAL FIBERS

M. Bylina¹, M. Halilov¹

¹The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Bylina M., Halilov M. Theoretical and Experimental Research of Loss in Optical Fibers // Proceedings of Educational Institutes of Communication. 2017. Vol. 3. Iss. 2. PP. 51–59.

Abstract: The loss formula for optical fibers with constant radius of curvature of their axes is derived by expressing the field outside of the fiber in terms of a superposition of cylindrical outgoing waves. In this paper we show that the bending losses of fiber modes can be calculated with the help of curvature-loss formula for slab wave guides and the validity of the result by showing that it is in agreement with the known dependence attenuation from parameters of the slab waveguide and of the LP_{01} -mode of the round step-index fiber.

Keywords: bending loss, attenuation coefficient, mode, optical fiber, single-mode fiber.

Изложенная в литературе теория распространения излучения по оптическим волокнам (ОВ) обычно относится к прямым ОВ. Реальные ОВ имеют изгибы, которые могут носить как систематический, так и случайный характер. Систематические изгибы возникают, например, при скрутке модулей с ОВ в оптическом кабеле (ОК). Случайные изгибы возникают при изготовлении ОК, при их прокладке и монтаже. В зависимости от отношения радиуса изгиба R к радиусу сердцевины r_c различают макро- ($R \gg r_c$) и микро-изгибы ($R \sim r_c$).

Любые изгибы ОВ приводят к увеличению затухания, обусловленного излучением части мощности направляемых мод в оболочку ОВ. Затухание резко возрастает с уменьшением радиуса изгиба. Изгибы ОВ могут выполнять и позитивные функции. Они могут использоваться для ввода и вывода излучения через боковую поверхность ОВ без его разрыва, например, при организации служебной связи, для конструирования аттенуаторов и т. п.

Рассмотрим методику расчета коэффициента затухания, обусловленного макроизгибом постоянного радиуса ОВ круглого поперечного сечения со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП), основанную на расчете распределений напряженностей электрических полей направляемых мод.

В [1] физический механизм потерь на излучение направляемой моды в оболочку ОВ при макроизгибе объясняется следующим образом. При постоянном радиусе изгиба R фазовые фронты полей направляемых мод вращаются вокруг центра кривизны изгиба C с постоянной угловой скоростью (рис. 1).

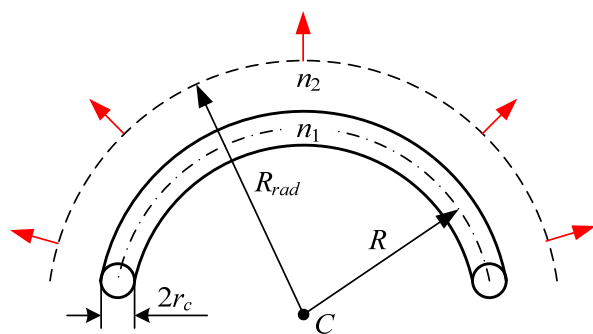


Рисунок 1. Физический механизм потерь на излучение в изогнутом участке ОВ

Поэтому фазовая скорость, параллельная оси ОВ возрастает при увеличении расстояния от центра кривизны C . Поскольку оболочка ОВ имеет постоянный показатель преломления (ПП), фазовая скорость может превышать скорость света в данной среде. Поэтому должен существовать некоторый радиус R_{rad} в плоскости изгиба, при превышении которого поле уже не может направляться ОВ и должно становиться излучающим.

Определим коэффициент затухания α (Нп/м), обусловленный только макроизгибом [1]:

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{P_{rad}}{P_{in}}, \quad (1)$$

где P_{in} – мощность на входе изогнутого участка; P_{rad} – мощность, излученная в оболочку; L – длина изогнутого участка.

В [2, 3] получено выражение для расчета коэффициента затухания α_{lm} направляемой линейно-поляризованной моды LP_{lm} на изогнутом участке ОВ со ступенчатым ППП:

$$\alpha_{lm}(R) = \frac{\sqrt{\pi} U_{lm}^2 e^{-\frac{2}{3} \frac{W_{lm}^3}{r_c^3 \beta_{lm}^2}}}{e_l V^2 \sqrt{r_c W^3 R} K_{l-1}(W) K_{l+1}(W)}, \quad (2)$$

где $V = k r_c (n_1^2 - n_2^2)^{0,5}$ – нормированная частота ОВ; $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число; λ – длина волны; n_1 и n_2 – ПП сердцевин и оболочки ОВ; β_{lm} – постоянная распространения направляемой моды LP_{lm} в ОВ; l и m – азимутальный и радиальный порядки моды; e_l – коэффициент, равный 2, если $l = 0$, и равный 1 при $l \neq 0$, $U_{lm} = r_c (n_1^2 k^2 - \beta_{lm}^2)^{0,5}$; $W_{lm} = r_c (\beta_{lm}^2 - n_2^2 k^2)^{0,5}$ – безразмерные скалярные параметры моды LP_{lm} в сердцевине и в оболочке, являющиеся решениями характеристического уравнения, которое для рассматриваемого ОВ имеет вид:

$$U \frac{J_{l+1}(U)}{J_l(U)} = W \frac{K_{l+1}(W)}{K_l(W)}, \quad (3)$$

где $J_l(x)$ – функция Бесселя первого рода l -го порядка; $K_l(x)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода l -го порядка. Отметим, что для любых l и m справедливо:

$$V^2 = U_{lm}^2 + W_{lm}^2. \quad (4)$$

Выражение (2) получено при следующих упрощающих предположениях:

1) радиус оболочки ОВ полагался бесконечно большим;

2) волокно считалось слабонаправляющим, то есть высота ППП $\Delta \ll n_1$.

Отметим, что для высоты ППП справедливо выражение [1, 4]:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}. \quad (5)$$

Для проведения теоретического исследования в работе было проведено моделирование ОВ с оболочкой из чистого кварцевого стекла и сердцевиной из кварцевого стекла, легированного оксидом германия с концентрацией 3,5 молярных процента. Такое волокно по своим характеристикам близко к известному одномодовому (ОМ) стандартному ОВ марки SMF-28 [4].

На рис. 2 представлены зависимости ПП сердцевин и оболочки моделируемого ОВ от длины волны, рассчитанные по известному уравнению Селлмейера [5]:

$$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_i^2)}, \quad (6)$$

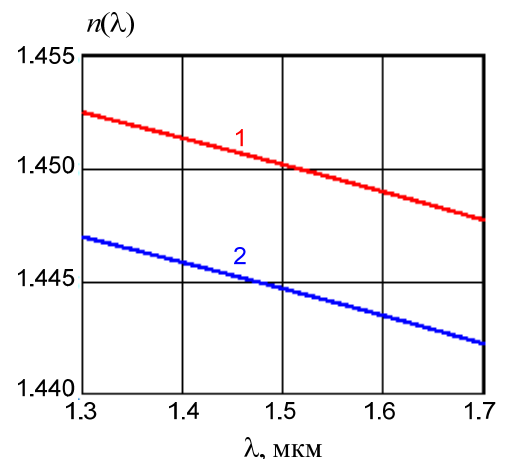


Рисунок 2. Параметры моделируемого ОВ:

1 – ПП сердцевин, 2 – ПП оболочки

где A_i и λ_i – эмпирические коэффициенты, значения которых для стекол сердцевины и оболочки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты Селлмейера для стекол сердцевины и оболочки

Состав стекла (в молярных процентах)	A_1	A_2	A_3	λ_1 , мкм	λ_2 , мкм	λ_3 , мкм
100 % SiO ₂	0,6961663	0,4079426	0,8974794	0,0684043	0,1162414	9,896161
3,5 % GeO ₂ , 96,5 % SiO ₂	0,7042038	0,4160032	0,9074049	0,0514415	0,1291600	9,896156

Единственной направляемой модой ОМ ОВ является мода LP_{01} . В этом случае $\alpha = \alpha_{01}$ и из (2) можно получить:

$$\alpha = \alpha_{01} = \frac{\sqrt{\pi} U_{01}^2 e^{-\frac{2}{3} \frac{W_{01}^3}{r_c^3 \beta_{01}^2} R}}{4V^2 \sqrt{r_c R W_{01}^3} K_1^2(W_{10})}, \quad (7)$$

где U_{01} , W_{01} – безразмерные скалярные параметры моды LP_{01} в сердцевине и оболочке ОВ; β_{01} – постоянная распространения моды LP_{01} .

В табл. 2 представлены результаты расчета β_{01} , доли η мощности моды LP_{01} в сердцевине ОВ и эффективного показателя преломления моды LP_{01} по выражениям [1]:

$$\beta_{01} = \sqrt{k^2 n_1^2 - \frac{U_{01}^2}{r_c^2}}, \quad (8)$$

$$\eta = \frac{U_{01}^2}{V^2} \left(\frac{W_{01}^2}{U_{01}^2} - \frac{K_0^2(W_{01})}{K_1^2(W_{01})} \right), \quad (9)$$

$$n_{eff} = \frac{\beta_{01}}{k}, \quad (10)$$

где $K_0(x)$, $K_1(x)$ – модифицированные функции Бесселя второго рода 0-го и 1-го порядка. Радиус сердцевины r_c принимался равным 4,1 мкм.

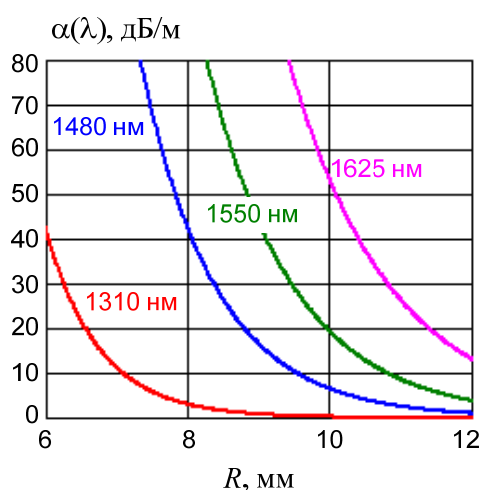
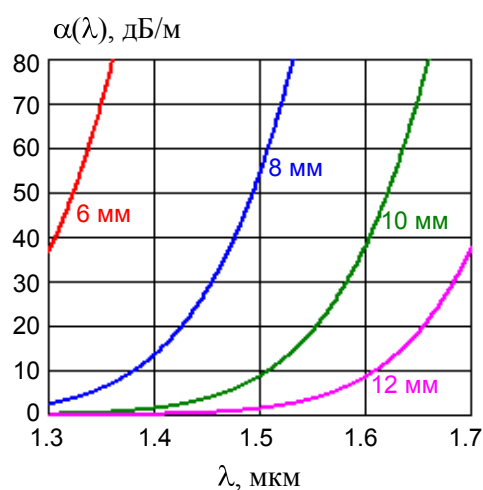
Таблица 2. Параметры моделируемого ОВ

λ , нм	n_1	n_2	NA	β_{01} , 1/мкм	n_{eff}	η , %
1310	1,45231	1,44680	0,012631	6,95387	1,44983	84,0
1480	1,45034	1,44485	0,012607	6,14506	1,44746	78,8
1550	1,44951	1,44402	0,012597	5,86351	1,44647	76,5
1625	1,44859	1,44311	0,012586	5,58869	1,44539	73,9

В табл. 3 и на рис. 3 и 4 представлены результаты расчета по выражению (7) зависимости коэффициента затухания α изогнутого участка рассматриваемого ОВ от длины волны и радиуса изгиба.

Таблица 3. Зависимость α от радиуса изгиба и длины волны

Длина волны λ , нм	1310			1480			1550			1625		
Радиус изгиба R , мм	8	10	12	8	10	12	8	10	12	8	10	12
Коэффициент затухания α , дБ/м	3,00	0,22	0,02	42,40	6,48	1,01	99,71	19,32	3,82	220,1	53,25	13,15

Рисунок 3. Зависимость α от радиуса изгиба при разных длинах волнРисунок 4. Зависимость α от длины волны при разных радиусах изгиба

Из табл. 3 и рис. 3 видно, что с уменьшением радиуса изгиба коэффициент затухания изогнутого участка быстро возрастает. Эти расчеты позволяют оценить допустимый радиус изгиба ОМ ОВ R_a , если заданы число витков N и допустимое возрастание затухания Δa . Величина R_a может быть получена путем численного решения относительно R следующего уравнения:

$$\Delta a = N \cdot (2\pi R) \cdot \alpha_{01}(R), \quad (11)$$

где $\alpha_{01}(R)$ определяется выражением (7).

На рис. 5 представлено семейство графиков зависимостей допустимого радиуса изгиба от длины волны при разных Δa (расчет произведен при $N = 100$, $r_c = 4,1$ мкм).

Из табл. 3 и рис. 3 и 4 видно, что с ростом длины волны α также возрастает. Этот факт лежит в основе рекомендации [6] проводить рефлектометрические измерения волоконно-оптических линий связи для поиска изгибов на двух различных длинах волн.

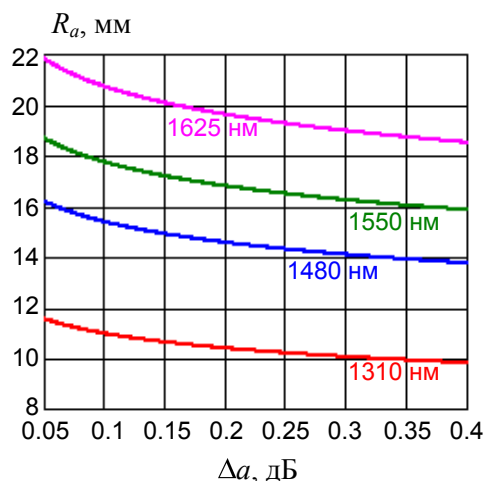


Рисунок 5. Зависимость R_a от допустимого возрастания затухания при разных длинах волн

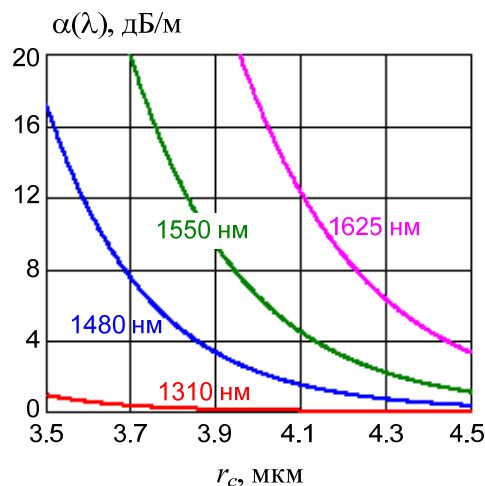


Рисунок 6. Зависимость α от радиуса сердцевины при разных длинах волн

Результаты измерений позволяют идентифицировать изгиб ОВ и определить его параметры. Обычно используются измерения на рабочей длине волны и на длине волны существенно больше рабочей.

В работе также было проведено исследование зависимости α_{01} от радиуса r_c сердцевины ОВ и высоты ППП Δ .

В табл. 4 и на рис. 6 представлены результаты расчета α по выражению (7) для $R = 10$ мм и различных r_c и λ . Видно, что при увеличении r_c коэффициент затухания α уменьшается.

Таблица 4. Зависимость α от радиуса сердцевины ОВ и длины волны

Длина волны λ , нм	1310			1480			1550			1625		
Радиус сердцевины r_c , мкм	4	4,25	4,5	4	4,25	4,5	4	4,25	4,5	4	4,25	4,5
Коэффициент затухания α , дБ/м	0,08	0,03	0,01	2,21	0,84	0,34	6,42	2,59	1,09	17,2	7,42	3,29

В табл. 5 и на рис. 7 представлены результаты расчета α при $r_c = 4,1$ мкм, $\lambda = 1310$ нм, $n_2 = 1,4468$ и различных Δ и R по выражению (7). Расчеты показали, что чем больше высота ППП, тем изгибные потери меньше.

Таблица 5. Зависимость α от высоты ППП и радиуса изгиба

Высота профиля ПП Δ , %	0,3			0,35			0,4		
Радиус изгиба R , мм	6	8	10	6	8	10	6	8	10
Коэффициент затухания α , дБ/м	199,7	41,21	8,78	31,46	3,40	0,38	3,60	0,18	0,01

Для проверки правильности расчетов в работе было проведено экспериментальное исследование, в ходе которого с помощью калиброванных оправок, диаметры которых приведены в табл. 6, создавались изгибы ОМ ОВ и с помощью оптического рефлектометра (ОР) DVP-321 измерялись вносимые ими потери. Схема исследования приведена на рис. 8. Для обеспечения равномерного натяжения волокна и горизонтального положения витка на поверхности оправки в установке использовались небольшие грузики.

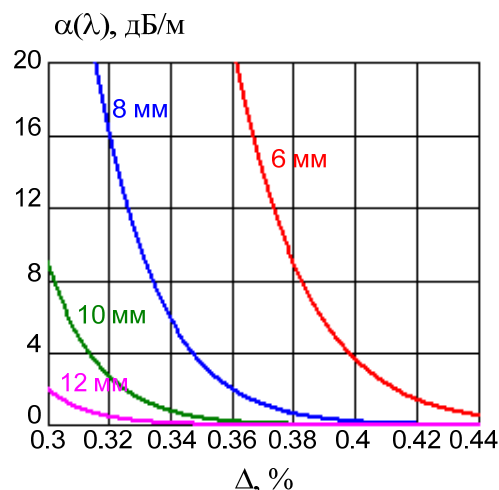


Рисунок 7. Зависимость α от высоты ППП при разных радиусах изгиба

Таблица 6. Диаметры калиброванных оправок

Номер оправки	Диаметр, мм	Номер оправки	Диаметр, мм
1	11,5	5	17,7
2	12,0	6	20,3
3	13,0	7	22,8
4	15,2	8	25,5

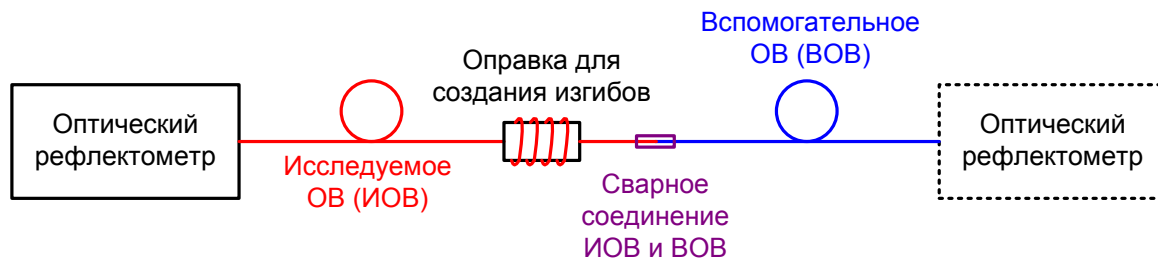


Рисунок 8. Схема экспериментальной установки

В качестве исследуемого ОВ использовалось ОМ ОВ марки SMF-28 производства Corning, параметры которого представлены в табл. 7.

В работе была использована следующая методика исследования:

1. ОР поочередно подключался к экспериментальной установке со стороны исследуемого и вспомогательного ОВ и регистрировались рефлектограммы ОВ в отсутствие изгибов.

2. По зарегистрированным рефлектограммам измерялись потери α_1 , вносимые сварным соединением исследуемого и вспомогательного ОВ.

3. Исследуемое волокно подвергалось макроизгибу путем наматывания на оправку N полных витков (360°).

4. ОР поочередно подключался к экспериментальной установке со стороны исследуемого и вспомогательного ОВ и регистрировались рефлектограммы ОВ с макроизгибом. На рис. 9 (см. ниже) представлена одна из зарегистрированных рефлектограмм ОВ с макроизгибом.

5. По зарегистрированным рефлектограммам измерялись суммарные потери a_2 , вносимые сварным соединением исследуемого и вспомогательного ОВ и созданным макроизгибом.

6. Рассчитывались потери, вносимые созданным макроизгибом, по выражению:

$$a_{meas} = a_2 - a_1. \quad (12)$$

7. Определялся коэффициент затухания изогнутого участка исследуемого ОВ по выражению:

$$\alpha_{meas} = \frac{a_{meas}}{2\pi R_b N}, \quad (13)$$

где R_b – радиус оправки.

Таблица 7. Параметры ОМ ОВ SMF-28

Параметр	Значение на длинах волн	
	1310 нм	1550 нм
Максимальный коэффициент затухания, дБ/км	0,34	0,2
Диаметр модового поля, мкм	$9,2 \pm 0,4$	$10,4 \pm 0,8$
Длина волны отсечки, нм	≤ 1260	
Минимальная/минимальная длина волны нулевой дисперсии, нм	1301,5 / 1321,5	
Наклон дисперсионной характеристики на длине волны нулевой дисперсии, пс / (нм ² ·км)	0,092	
Диаметр сердцевинки типовой, мкм	8,2	
Диаметр оболочки, мкм	$125 \pm 0,7$	
Профиль показателя преломления	ступенчатый	

Измерения в п. 2 и 5 осуществлялись следующим образом:

1. По каждой из двух зарегистрированных рефлектограмм проводилось измерение вносимых потерь методом трех курсоров [7]. Фиксировались результаты измерения a_{11} и a_{12} в п. 2 и a_{21} и a_{22} в п. 5.

2. Рассчитывались потери a_1 и a_2 по следующим выражениям [6, 7]:

$$a_1 = \frac{a_{11} + a_{12}}{2}, \quad a_2 = \frac{a_{21} + a_{22}}{2}. \quad (14)$$

На рис. 10 (см. ниже) сопоставлены результаты измерений и теоретических расчетов. Видно, что они хорошо согласуются друг с другом.

В результате проведенных исследований установлено, что коэффициент затухания изогнутого участка ОВ:

- 1) возрастает с увеличением длины волны оптического сигнала;
- 2) возрастает с уменьшением радиуса изгиба;
- 3) возрастает с уменьшением радиуса сердцевинки оптического волокна;
- 4) возрастает с уменьшением высоты профиля показателя преломления.

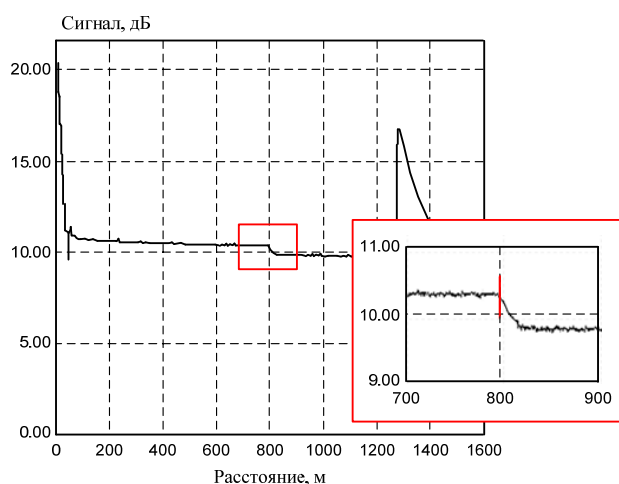


Рисунок 9. Рефлектограмма ОВ с макроизгибом радиуса $R = 10,15$ мм, зарегистрированная на длине волны 1550 нм при длительности зондирующего импульса 200 нс

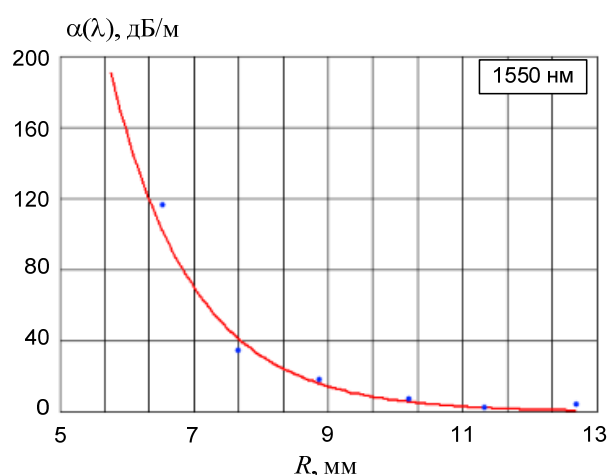


Рисунок 10. Зависимость α от радиуса изгиба: теоретически рассчитанная (красная кривая) и экспериментально измеренная (синие точки)

Список используемых источников

1. Снайдер А. Теория оптических волноводов; пер. с англ. / Под ред. Е.М. Дианова, В.В. Шевченко. М.: Радио и связь. 1987. 656 с.
2. Marcuse D. Curvature Loss Formula for Optical Fibers // J. Opt. Soc. Am. Vol. 66. Iss. 3 (March 1976). PP. 216–220.
3. Wang Q., Farrell G., Freir T. Theoretical and Experimental Investigations of Macro-Bend Losses for Standard Single Mode Fibers // Optics Express. Vol. 13. Iss. 12 (13 June 2005). PP. 4476–4484.
4. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: Вэлком. 2003. 288 с.
5. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов: пер. с англ. / Под ред. И.Н. Сисакяна. М.: Мир, 1984. 512 с.
6. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС. 1999. 671 с.
7. Былина М.С., Глаголев С.Ф., Кочановский Л.Н., Пискунов В.В. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов: учеб. пособие, СПбГУТ. СПб., 2002. 82 с.