

## ВЛИЯНИЕ ИЗГИБОВ ОПТОВОЛОКНА СПЕКТРОМЕТРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

*Рассмотрены физические явления, возникающие при изгибе оптического волокна. Рассчитано и экспериментально продемонстрировано влияние изгиба на потери передаваемого потока излучения. Приведены результаты колориметрических измерений при различных радиусах изгиба.*

### Оптическое волокно, спектрометр, колориметрические измерения

При распространении света в оптическом волокне часть светового потока выходит за пределы сердцевины оптоволоконна. Интенсивность излучения ( $I$ ), вышедшего из сердцевины диаметром  $d$  в оболочку оптоволоконна диаметром  $D$  на расстояние  $r = (D - d)/2$  в зависимости от угла падения  $\varphi_0$  на границе «сердцевина–оболочка», определяется [1], [2] выражением

$$I = I_0 \exp\left(-4pn_1(r/\lambda)\sqrt{\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi_{\text{т.г}}}\right),$$

где  $I_0$  – интенсивность излучения, передаваемого по оптическому волокну;  $n_1$  – показатель преломления материала сердцевины оптоволоконна;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $\varphi_{\text{т.г}}$  – угол полного внутреннего отражения.

Это приводит к тому, что при изготовлении оптоволоконна оболочка занимает значительную часть. При приближении угла падения ( $\varphi_0$ ) к углу полного отражения ( $\varphi_{\text{т.г}}$ ) показатель степени экспоненты стремится к нулю, свет распространяется по всей структуре волокна – сердцевине и оболочке.

В волоконных световодах могут существовать два типа волн: симметричные –  $E_{0m}$  и  $H_{0m}$  и несимметричные гибридные –  $EH_{nm}$  и  $HE_{nm}$ , где  $n$  – число изменений поля по периметру;  $m$  – число изменений поля по диаметру. Симметричные волны электрические  $E_{0m}$  и магнитные  $H_{0m}$  имеют круговую симметрию ( $n = 0$ ).

По волоконным световодам возможна передача двух типов лучей: меридиональных и косых. Меридиональные лучи расположены в плоскости, проходящей через ось волоконного световода. Косые лучи не пересекают ось световода и проходят по сложным траекториям. Меридиональным лучам соответствуют симметричные электрические  $E_{0m}$  и магнитные  $H_{0m}$  волны, косым лучам – несимметричные гибридные волны  $EH_{nm}$  и  $HE_{nm}$ .

Число типов волн (мод) в световоде ( $N$ ) зависит от диаметра сердцевины и длины волны:

$$N = \frac{(pd)^2(n_1^2 - n_2^2)}{2\lambda^2(1 + 2/u)}, \quad (1)$$

где  $u$  – показатель степени изменения профиля показателя преломления;  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления материалов сердцевины и оболочки оптоволоконна. Из формулы

(1) видно, что чем больше диаметр сердцевины волокна и меньше длина волны излучения, тем больше возникает мод.

При изгибе оптического волокна происходит изменение угла падения электромагнитной волны на границе «сердцевина–оболочка». Угол падения становится меньше предельного угла, что означает выход части электромагнитного излучения из световода. Изгиб оптического волокна приводит к сильному побочному излучению в месте изгиба.

Оценим максимальный радиус изгиба, при котором наблюдается побочное излучение в точке изгиба световода с диаметром сердцевины  $d$ , связанное с нарушением полного внутреннего отражения. Максимальный радиус изгиба определяется выражением

$$R \leq d \frac{n_2}{n_1 - n_2}, \quad (2)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления материалов сердцевины и оболочки оптоволокна.

Оценка радиуса изгиба по формуле (2) для многомодового волокна с диаметром сердцевины  $d = 400$  мкм и оптической оболочки  $D = 500$  мкм ( $n_1 = 1.481$ ,  $n_2 = 1.476$ ) показывает, что прохождение излучения в точке изгиба начинает наблюдаться при  $R < 14.5$  см.

Резкие изгибы волокна приводят к тому, что часть света (моды высших порядков, для которых перестает выполняться закон полного внутреннего отражения) не будет отражаться от оболочки, а будет в ней распространяться и таким образом теряться.

Для проведения исследования влияния изгибов оптоволокна на колориметрические измерения используется галогенная лампа. Важным аспектом, на который следует обратить внимание, является постоянство спектра излучения источника во время проведения исследования. При нагревании сопротивление лампы уменьшается, тем самым увеличивается ток накала спирали, как следствие, увеличивается интенсивность излучения лампы и изменяется ее спектр. Решением данной проблемы является использование стабилизированного источника тока. Используемая схема стабилизации позволяет поддерживать заданные значения тока и напряжения с достаточной для проведения исследования точностью (не менее  $\pm 1\%$ ).

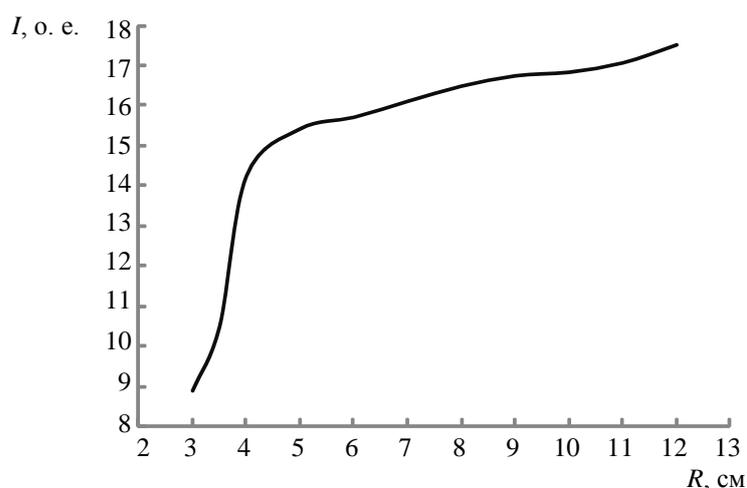


Рис. 1

Изменяя диаметр изгиба волокна, снимем спектры излучения галогенной лампы с помощью спектрометра. На рис. 1 показана зависимость мощности излучения лампы, поступающая на ПЗС-фотоприемник от диаметра изгиба оптического волокна. Анализ приведен-

ной зависимости показывает, что при уменьшении диаметра изгиба оптического волокна менее

4 см наблюдается резкое уменьшение интенсивности излучения, поступающего на ПЗС-приемник. При диаметрах изгибов 12...4 см с уменьшением диаметра изгиба наблюдается постепенное уменьшение потока излучения. В свою очередь, рассмотрение изгибов с диаметром менее 3 см практически не осуществимо в связи с возможным разрушением волокна. Полученный график хорошо согласуется с полученными в схожих исследованиях данными [3].

На рис. 2 приведены нормированные по амплитуде спектры излучения лампы для двух крайних случаев изгибов (1 – диаметр 12 см, 2 – диаметр 3 см). Видно, что при сильном изгибе возникает искажение спектра со стороны коротких длин волн. Этот эффект объясняется потерей части мод в изогнутом волокне из-за нарушения условия полного внутреннего отражения. В соответствии с формулой (1) видно, что для меньших длин волн существует большее число мод, и, следовательно, большее их число не будет распространяться в изогнутом оптическом кабеле.

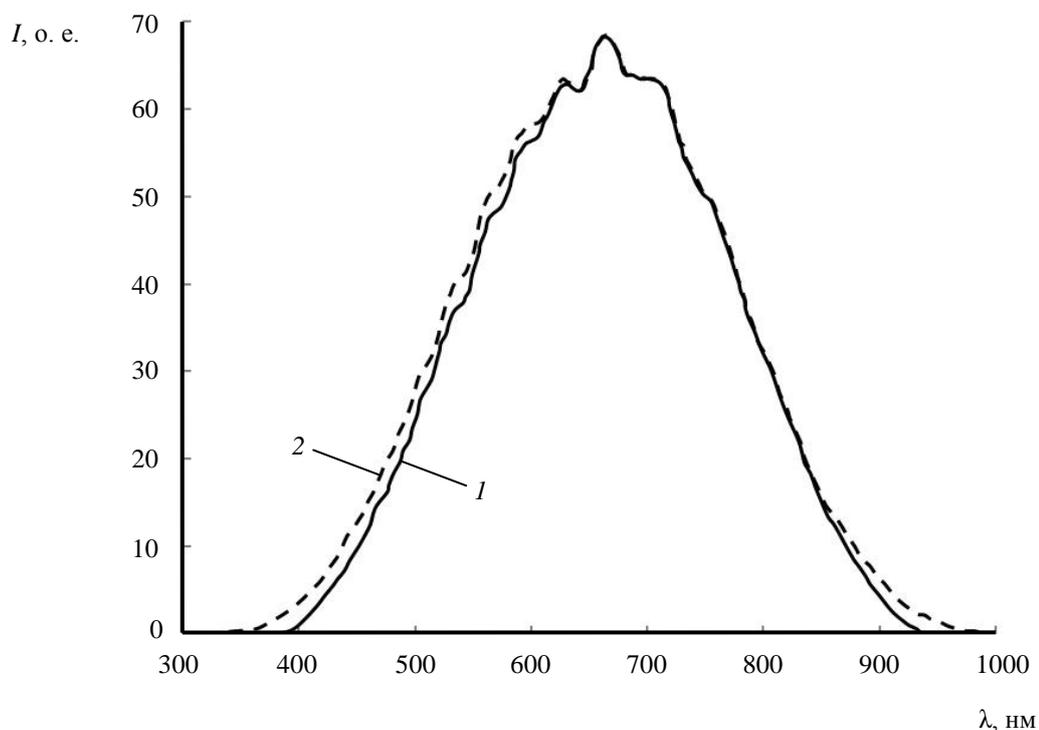


Рис. 2

Уменьшение интенсивности излучения в коротковолновой части спектра приводит к смещению центра тяжести фигуры, ограниченной кривой спектральной плотности в сторону больших длин волн, что, несомненно, должно оказать влияние на результаты цветовых измерений.

Получив зависимости спектральной плотности потока излучения ( $P_\lambda$ ) от длины волны, можно перейти к определению колориметрических величин. Результаты вычислений координат цветности и доминирующей длины волны для всех рассмотренных случаев изгиба волокна сведены в таблицу.

Диаметр изгиба, см	Координаты цветности			$\lambda_{\text{дом}}, \text{нм}$
	$x$	$y$	$z$	
3.0	0.457	0.429	0.115	581.2
3.5	0.454	0.428	0.118	581.0
4.0	0.452	0.427	0.121	580.9
5.0	0.451	0.427	0.123	580.9
6.0	0.449	0.426	0.125	580.8
7.0	0.444	0.426	0.131	580.3
8.0	0.445	0.426	0.130	580.4
9.0	0.444	0.425	0.130	580.4
10.0	0.444	0.426	0.130	580.4
11.0	0.445	0.425	0.130	580.4
12.0	0.445	0.425	0.130	580.4

Изменение диаметра изгиба с 12 до 3 см приводит к увеличению координат цветности  $x$  и  $y$  на 2.5 и 0.7 % соответственно. Доминирующая длина волны претерпевает смещение в сторону больших длин волн на 0.8 нм.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о достаточно существенном влиянии изгибов оптоволокну на колориметрические измерения. При проведении спектрофотометрических исследований изгиб волокна приводит лишь к незначительному уменьшению интенсивности излучения, что легко может быть компенсировано увеличением чувствительности прибора (увеличением времени накопления ПЗС-фотоприемника). В случае цветных измерений наблюдается существенное смещение координат цветности и соответствующей им доминирующей длины волны в сторону больших длин волн.

Анализируя полученные экспериментальные результаты, можно прийти к выводу о целесообразности недопущения изгибов оптического волокна ниже некоторых допустимых значений диаметра изгиба (в данном конкретном случае критический диаметр составляет примерно 4 см).

Вторым способом уменьшения влияния изгиба волокна является использование более тонких оптических волокон, менее чувствительных к изгибам ввиду меньшего числа распространяющихся в них мод. Также достаточно перспективным может быть использование градиентного оптоволокну. Такие волокна обладают большой устойчивостью к изгибу, как ввиду меньшего числа мод, так и параболического профиля показателя преломления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
2. Введение в интегральную оптику / под ред. М. Барноски; пер. с англ. под ред. Т. А. Шмаонова. М.: Мир, 1977. 368 с.
3. Acuña R., Causado J., Torres P. I. Sensor de fibra óptica para medición de pequeños desplazamientos basado en pérdidas por curvatura // Revista colombiana de física. 2006. Vol. 38, № 2. P. 866–869.

*D. K. Kostrin, A. A. Uhov*

#### *INFLUENCE OF BENDS OF THE OPTICAL FIBER OF THE SPECTROMETER ON RESULTS OF COLORIMETRIC MEASUREMENTS*

*The physical phenomena arising at a bend of optical fiber are considered. Influence of a bend on losses of a transferred stream of radiation is calculated and experimentally shown. Results of colorimetric measurements are given at various radiuses of a bend.*

**Optical fiber, spectrometer, colorimetric measurements**