

УДК 535.314

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ СТЫКОВКЕ СВЕТОВОДОВ С РАЗЛИЧНЫМ ДИАМЕТРОМ МОДОВОГО ПОЛЯ

А.В. Варламов, А.В. Куликов, В.Е. Стригалева, С.В. Варжель, С.М. Аксарин

Для минимизации оптических потерь при создании оптоволоконных систем проведено измерение углового распределения выходного излучения двулучепреломляющих оптических волокон с эллиптической напрягающей оболочкой с 4, 12, 16 и 18 мол.% GeO₂. Полученные данные позволяют прогнозировать потери при стыковке волокон с эллиптической напрягающей оболочкой с различной концентрацией GeO₂ между собой, а также со стандартными телекоммуникационными волокнами типа SMF-28, другими двулучепреломляющими световодами и элементами интегральной оптики.

Ключевые слова: диаметр модового поля, стыковка оптических волокон, двулучепреломление.

Введение

При создании распределенных волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков (ФИД) на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [1] необходимо подобрать оптические волокна (ОВ), обладающие, с одной стороны, достаточной фоторефрактивностью для записи в них решеток Брэгга [2], с другой стороны, приемлемыми для той или иной системы линейными оптическими потерями. Кроме того, для компоновки ФИД на основе ВБР необходимы данные по оптическим потерям при стыковке различных типов ОВ. Это позволит минимизировать суммарные оптические потери создаваемого измерительного комплекса. Оптические потери на стыковке ОВ можно определить, измерив диаметры модового поля световодов. В работе исследуются уникальные анизотропные одномодовые волоконные световоды (АОВС) с эллиптической напрягающей оболочкой (ESC), изготовленные по технологии [3, 4], обладающие высокой фоторефрактивностью для эффективной записи в них решеток Брэгга. Для увеличения фоторефрактивности исследуемых ОВ молярная концентрация диоксида германия (GeO₂) в сердцевине увеличена до 12, 16 и 18% по сравнению с 4% для «стандартного» АОВС с ESC. Актуальность работы состоит в том, что в литературе нет данных по измерению диаметра модового поля для исследуемых типов ОВ.

Зависимость оптических потерь на стыке световодов от диаметра модового поля

Величина потерь на стыке соединений определяется выражением [5]

$$D_{\text{общ}} = D_{\text{ор}} + D_{\text{дм}} + D_{\text{ую}} + D_3 + D_{\text{рпп}} \text{ (дБ)}, \tag{1}$$

где $D_{\text{ор}}$ – потери из-за осевого рассогласования модовых полей; $D_{\text{дм}}$ – потери из-за разницы диаметров модовых полей; $D_{\text{ую}}$ – потери из-за погрешности угловой юстировки осей ОБ; D_3 – потери, обусловленные эллиптичностью модового поля; $D_{\text{рпп}}$ – потери из-за разницы показателей преломления.

В настоящей работе представлены результаты исследования оптических потерь из-за разницы диаметров модовых полей, поскольку они вносят определяющий вклад в суммарную величину потерь при стыковке волокон с различным содержанием GeO_2 в сердцевине. Основная часть оптического излучения, распространяющегося по волокну, локализована в его сердцевине, а остальная часть излучения распространяется в оболочке. По этой причине диаметр модового поля больше, чем физический диаметр сердцевины волокна. Диаметр модового поля является функцией длины волны источника, радиуса сердцевины волокна и профиля показателя преломления волокна. Таким образом, для оптических волокон с одинаковым физическим диаметром сердцевины диаметр модового поля может быть различным. Полагая, что поле моды в волокне аппроксимируется функцией Гаусса, потери на стыке одномодовых анизотропных волокон с различными диаметрами поля мод при условии согласования осей можно представить как [6]

$$D_{\text{дм}} = -10 \log_{10} \left(\frac{2w_{0x}w'_{0x}}{w_{0x}^2 + w'_{0x}{}^2} \cdot \frac{2w_{0y}w'_{0y}}{w_{0y}^2 + w'_{0y}{}^2} \right), \tag{2}$$

где w_{0x} и w_{0y} – радиусы поля моды на уровне $1/e^2$ интенсивности оптического излучения на ортогональных осях для одного волокна; w'_{0x} и w'_{0y} – радиусы поля моды на уровне $1/e^2$ интенсивности оптического излучения на ортогональных осях для второго волокна.

С учетом малых отличий радиусов поля моды, измеренных для быстрой и медленной осей [7], формула (2) примет вид [6]

$$D_{\text{дм}} = -10 \log_{10} \left(\frac{2w_0w'_0}{w_0^2 + w'_0{}^2} \right)^2. \tag{3}$$

Определение диаметра модового поля световодов и оптических потерь при их стыковке

На рис. 1 представлена разработанная схема измерительной установки.

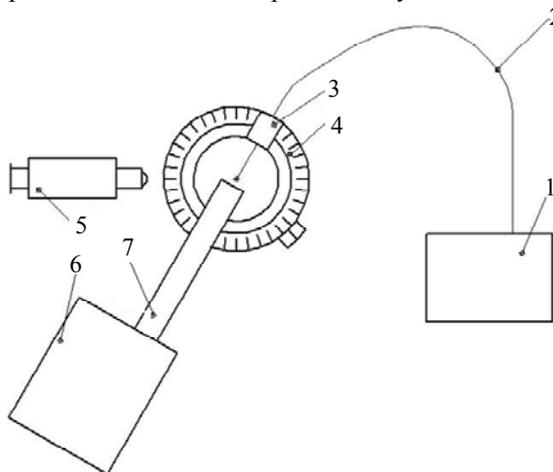


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – источник оптического излучения; 2 – исследуемое волокно; 3 – волоконный вращатель; 4 – микроскоп с градуированным, поворачивающимся приборным столиком; 5 – микроскоп, перпендикулярный оси вращения поворотного столика; 6 – измеритель оптической мощности; 7 – экран

В качестве источника оптического излучения 1 применен лазерный диод с длиной волны излучения 1,55 мкм и мощностью 1 мВт. К источнику подсоединен исследуемый образец ОБ. Свободный конец световода 2 скалывается под углом 90° к оси волокна и крепится на волоконный вращатель 3, обеспечивающий вращение волокна вокруг своей оси. Вращатель закреплен на поворачивающемся приборном столике микроскопа. Микроскоп 4 используется для точной юстировки торца волокна и оси вращения столика. Перпендикулярно оси вращения поворотного столика расположен второй микроскоп 5, позволяющий установить оси двулучепреломляющих ОБ в одинаковое положение относительно оси вращения волокна. Одинаковое расположение осей позволяет не учитывать коэффициент поляризационной чувствительности измерителя оптической мощности и проводить измерения волокон в одинаковых условиях.

На расстоянии 1 см от торца волокна расположен измеритель оптической мощности 6 с экраном 7. Таким образом, в данной работе для определения диаметра модового поля световодов в дальнем поле перемещается конец волокна, а измеритель оптической мощности неподвижен, что позволяет достичь высокой точности измерений без использования компьютерного управления, как это предложено в работе [7], в которой используется установка с подвижным датчиком, управляемым компьютером.

Приборный столик микроскопа поворачивался с шагом 1°, при этом измерялась интенсивность оптического излучения. Экспериментальные графики зависимости нормированной интенсивности оптического излучения от угла для «быстрой» оси двулучепреломляющих волокон представлены на рис. 2. Исследования проведены на образцах АОВС с ESC, сердцевина которых легирована 4, 12, 16 и 18 мол.% GeO₂. Для сравнения исследованы ОВ широкого промышленного производства типа PANDA и SMF-28 [8].

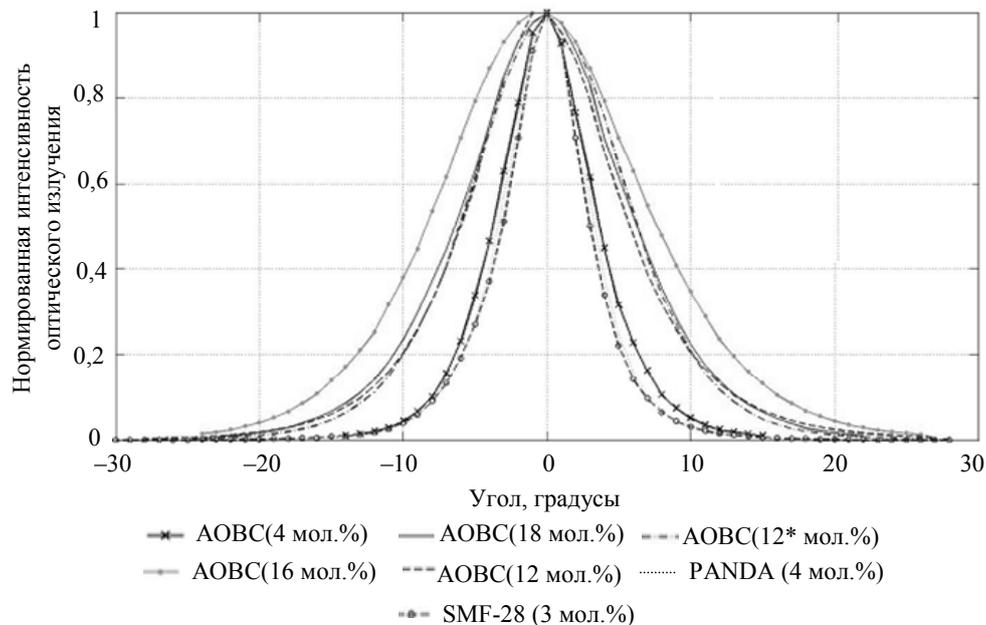


Рис. 2. Зависимость нормированной интенсивности излучения от угла; в скобках указана молярная концентрация GeO₂ в сердцевине ОВ

Тип волокна	АОВС					PANDA	SMF-28
	4	18	12*	16	12		
Содержание GeO ₂ , мол.%	4	18	12*	16	12	4	3
Радиус модового поля, мкм	3,82	2,34	2,48	1,89	2,39	4,25	4,32

* – образец был изготовлен по модифицированной технологии MCVD (modified chemical vapor deposition) [9]

Таблица 1. Радиусы модовых полей исследованных типов ОВ, рассчитанные по формуле (4)

Стыкуемые волокна	АОВС 4 мол.% GeO ₂	АОВС 18 мол.% GeO ₂	АОВС 12 мол.% GeO ₂ (*)	АОВС 16 мол.% GeO ₂	АОВС 12 мол.% GeO ₂	PANDA 4 мол.% GeO ₂
АОВС 18 мол.% GeO ₂	1,01 (1,1–1,5)					
АОВС 12 мол.% GeO ₂ (*)	0,79 (0,7–1,1)	0,02				
АОВС 16 мол.% GeO ₂	1,99 (2,1–2,7)	0,19	0,32			
АОВС 12 мол.% GeO ₂	0,93 (1,0–1,6)	0,01	0,01	0,23		
PANDA 4 мол.% GeO ₂	0,05	1,47	1,21	2,58	1,38	
SMF-28 3 мол.% GeO ₂	0,07	1,54	1,27	2,67	1,45	0,01

* – образец был изготовлен по модифицированной технологии MCVD [9]

Таблица 2. Расчетные и измеренные (в скобках) потери при стыковке различных типов ОВ, дБ

Для исследованных образцов ОВ найдены телесные углы модового поля на уровне $1/e^2$, а также вычислены значения радиусов модового поля (табл. 1). Радиус модового поля вычислен по формуле [6]

$$w_0 = 2 \cdot \frac{\lambda}{\pi \theta_d}, \quad (4)$$

где w_0 – радиус модового поля; λ – длина волны; θ_d – телесный угол модового поля.

С учетом значений радиусов модового поля рассчитаны по формуле (3) теоретические потери при сварке различных типов ОВ (табл. 2). Измеренные значения потерь при стыковке приведены для соединений АОВС со «стандартным» содержанием GeO_2 4 мол.% с АОВС, сердцевина которых легирована 12, 16 и 18 мол.% GeO_2 , предназначенных для записи ВБР. Как видно из таблицы, нижняя граница измеренных значений потерь близка к расчетной и зависит от степени легирования стыкуемых волокон GeO_2 . Как и следовало ожидать, измеренные значения потерь несколько превышают расчетные, поскольку при расчете учтены лишь потери из-за различий диаметра модового поля $D_{\text{дм}}$, а иные виды потерь (1) не учтены.

Заключение

Для минимизации оптических потерь при создании оптоволоконных систем проведено измерение углового распределения выходного излучения анизотропных одномодовых волоконных световодов с эллиптической напрягающей оболочкой, сердцевина которых легирована 4, 12, 16 и 18 мол.% GeO_2 . Полученные данные позволяют прогнозировать потери на стыковке оптических волокон между собой, а также со стандартными телекоммуникационными волокнами типа SMF-28, другими двулучепреломляющими световодами и элементами интегральной оптики. Измеренные значения потерь коррелируют с расчетными.

Литература

1. Варжель С.В., Стригалева В.Е. Метод устранения влияния сигнала помехи на чувствительность приема гидроакустической антенны на основе волоконных брэгговских решеток // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 5–8.
2. Варжель С.В., Куликов А.В., Асеев В.А., Брунов В.С., Калько В.Г., Артеев В.А. Запись узкополосных волоконных брэгговских отражателей одиночным импульсом эксимерного лазера методом фазовой маски // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – Т. 75. – № 5. – С. 27–30.
3. Дукельский К.В., Ероньян М.А., Комаров А.В., Кондратьев Ю.Н., Ромашова Е.И., Серков М.М., Хохлов А.В. Тонкие анизотропные одномодовые волоконные световоды с эллиптической напрягающей оболочкой // Оптический журнал. – 2000. – Т. 57. – № 10. – С. 104–106.
4. Буреев С.В., Дукельский К.В., Ероньян М.А., Злобин П.А., Комаров А.В., Левит Л.Г., Страхов В.И., Хохлов А.В. Технология крупногабаритных заготовок анизотропных одномодовых световодов с эллиптической оболочкой // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 4. – С. 85–87.
5. Катов В., Ковтун А., Руденко И. Оптоволоконно: неразъемные соединения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://citforum.ru/nets/hard/optonet/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 02.11.2012).
6. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. – London: Artech House, 1992. – 313 p.
7. Young M. Mode-field diameter of single-mode optical fiber by far-field scanning // Applied Optics. – 1998. – V. 37. – № 24. – P. 5605–5619.
8. Mendez A., Morse T.F. Specialty Optical Fibers Handbook. – Burlington: Academic Press, 2007. – 250 p.
9. Варжель С.В., Ероньян М.А., Мешковский И.К., Стригалева В.Е. Минимизация оптических потерь одномодовых световодов с высокой концентрацией GeO_2 // Сборник трудов X международной конференции «Прикладная оптика-2012». – 2012. – С. 184–187.

- Варламов Андрей Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, b.a.b.92@bk.ru
- Куликов Андрей Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, a.kulikov86@gmail.com
- Стригалева Владимир Евгеньевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru
- Варжель Сергей Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vsv187@gmail.com
- Аксарин Станислав Михайлович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, oskar2002@list.ru