

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ МИКРО- СТРУКТУРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

*Рассмотрена проблема сварки микроструктурированных оптических волокон с одномодовыми волокнами. Исследованы основные причины потерь при сварке: несоответствие диаметров модовых полей и полное разрушение воздушных отверстий. Предложены различные способы соединения в зависимости от структуры микроструктурированных волокон*

**А. И. Филиппенко**

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра технологии и автоматизации производства  
радиоэлектронных и электронно-вычислительных средств\*  
e-mail: fia@kture.kharkov.ua

**А. В. Бакайся**

Студентка\*  
Контактный тел.: (057) 363-15-45, (097) 659-58-20  
E-mail: nastenok\_@ukr.net

\*Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
пр.Ленина, 14, г.Харьков, 61166

## 1. Анализ состояния вопроса и постановка задачи исследования

Микроструктурированные оптические волокна (MOF) появились в середине 90-х годов и изменили традиционную нелинейную оптику. Благодаря уникальным свойствам волокна этого типа открывают новые возможности в таких областях как спектроскопия, биомедицина, телекоммуникации и др. Технология MOF может обеспечивать одномодовый способ передачи в широком диапазоне. MOF включает двухмерную периодическую структуру воздушных пустот в пределах кварцевой оболочки, причем сердцевина может быть кварцевой либо в виде полого воздушного волновода.

При использовании микроструктурированных волокон возникает необходимость реализации их соединения. Особое внимание уделяется проблеме сварки микроструктурированного волокна с одномодовым (SMF). Впервые об экспериментальном соединении было сообщено в 1999 году. В процессе сварки происходит разрушение воздушных капилляров микроструктурированного волокна, что приводит к увеличению потерь в сварном соединении. Одним из решений данной проблемы является создание специальных MOF с кварцевой сердцевиной, которые будут иметь такие же размеры модовых полей, как и у одномодовых волокон. Также возможно использование MOF с легированной сердцевиной,

что обеспечивает распространение света при полном разрушении воздушных отверстий. Существует множество MOF с различными структурами микроструктурированных, поэтому характер разрушений, вызванных высокой температурой, в каждом отдельном случае будет различным.

Цель работы – выявление факторов и определения степени их влияния на величину оптических потерь в соединении MOF/SMF.

## 2. Анализ причин потерь при сварке MOF и SMF

Потери в сварном соединении MOF и SMF вызваны двумя причинами: несоответствием модовых полей и полным разрушением воздушных капилляров.

Несоответствия диаметров модовых полей обуславливаются изменениями в геометрической структуре поперечного сечения волокна. К геометрическим параметрам MOF можно отнести:

- диаметр воздушных отверстий,  $d$ ;
- межцентровое расстояние между соседними отверстиями  $\Lambda$ ;
- количество концентрических периодических слоев,  $N$ ;
- относительный размер отверстий,  $d/\Lambda$ ;
- расположение отверстий.

Потери из-за несоответствия модовых полей MOF и SMF:

$$\alpha = -20 \log \left( \frac{2\omega_{MOF}\omega_{SMF}}{\omega_{MOF}^2 + \omega_{SMF}^2} \right), \tag{1}$$

где  $\omega_{MOF}$  – модовое поле микроструктурированно-го волокна;

$\omega_{SMF}$  – модовое поле одномодового волокна.

В процессе сварки электроды сварочного аппарата нагреваются до температуры выше температуры размягчения волокна, причем температура размягчения MOF меньше, чем у SMF.

Размер зоны разрушения определяется следующим выражением:

$$V = \frac{\gamma}{2\eta}, \tag{2}$$

где  $\gamma$  – поверхностное натяжение;

$\eta$  – вязкость материала волокна.

При увеличении температуры в диапазонах, в которых происходит сварка, поверхностное натяжение кварца практически не изменяется, однако резко уменьшается вязкость, что приводит к увеличению количества разрушенных отверстий.

### 3. Анализ результатов экспериментальных исследований

Были исследованы соединения пяти различных MOF (LMA-10, HC-1550-02, LMA-5, NL-3.3-880 и PM-1550-01) с обычным одномодовым волокном SMF-28, характеристики волокон приведены в таблице 1 [1].

В случае соединения SMF-28/HC-1550-02 не был сформирован сварной шов, вследствие значительного разрушения отверстий. Длина разрушенной области для остальных волокон приблизительно равна 60-0мкм. Измеренные потери соответственно составили: 10,73 дБ; 20,11 дБ; 21,56 дБ и 25,78 дБ для SMF-28/LMA-10, SMF-28/LMA-5, SMF-28/NL-3.3-880, SMF-28/PM-1550-01.

Таблица 1

Характеристики волокон при  $\lambda = 1,55$  мкм

Тип волокна	Диаметр сердцевин, мкм	Относительный размер отверстий d/Λ	Период Λ, мкм	Модовое поле, мкм	Число-вая апертура NA
LMA-10	10,71	0,46	7,14	8,5	0,14
HC-1550-02	10,9	>90%	3,8	7,5	0,12
LMA-5	4,5	0,44	2,9	4,1	0,23
NL-3.3-880	3,4	>89%	3,0	2,2	0,41
PM-1550-01	-	Большое отверстие 0,97 Маленькое отверстие 0,51	4,17	Большое отверстие 3,6 Маленькое отверстие 3,1	-
SMF-28	8,3	-	-	10,4	0,14

Экспериментальные величины потерь из-за несоответствия модовых полей MOF и SMF согласуются с теоретическими значениями, определенными с помощью выражения (1). Результаты эксперимента и расчетов приведены в таблице 2 [1].

Таблица 2

Потери из-за несоответствия модовых полей MOF и SMF

Тип сварного соединения	Теоретические потери, дБ	Потери из-за несоответствия модовых полей, дБ	Оптимизированные потери, дБ
SMF-28/LMA-10	0,18	0,41	0,19
SMF-28/HC-1550-02	0,46	1,50	1,45
SMF-28/LMA-5	3,32	3,62	0,90
SMF-28/NL-3.3-880	7,85	8,14	2,53
SMF-28/PM-1550-01	4,70	4,88	2,03

Для микроструктурированных волокон, у которых модовые поля подобны с модовыми полями одномодового волокна, например, LMA-10 и HC-1550-02, возможно достижение малых потерь при сварке, в отличие от случая, когда диаметр модового поля MOF намного меньше диаметра модового поля SMF, даже при неразрушенных воздушных отверстиях.

### 4. Рекомендации по сварке MOF и SMF, обеспечивающей низкие потери

Наиболее эффективным решением для минимизации разрушений воздушных отверстий является выбор более слабого разряда и более короткого времени сварки по сравнению с параметрами соединения SMF/SMF. Выделяемая тепловая энергия должна с одной стороны размягчить торцы волокон для механической прочности сварного шва, с другой стороны, разрушать как можно меньше воздушных отверстий.

Поскольку температура размягчения MOF меньше, чем у SMF, необходимо ввести некоторое смещение (рис. 1) между соединением и центральной осью разряда дуги. Такое смещение гарантирует уменьшение температуры, которая воздействует на MOF, что уменьшает разрушение отверстий, и позволяет уравновесить процесс оплавления волокон.

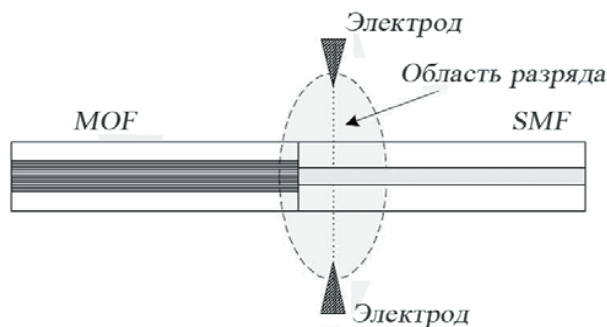


Рисунок 1. Смещение центральной оси разряда дуги

Как было упомянуто выше, для случая, когда MOF и SMF имеют подобные диаметры модовых полей, воз-

можно формирование сварного шва с хорошими механическими характеристиками и с низкими потерями (рис 2).

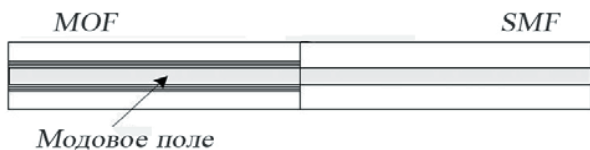


Рисунок 2. MOF и SMF с подобными диаметрами модовых полей

При сварке MOF с малой площадью сердцевины с SMF несоответствие диаметров модовых полей может вызвать большие потери, поэтому часто применяется промежуточное волокно, модовое поле которого соответствует модовому полю MOF (рис 3).

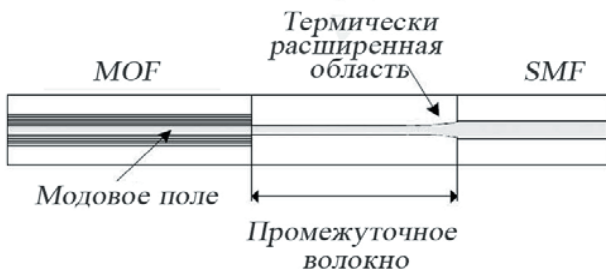


Рисунок 3. Промежуточное волокно

Более простым методом сварки MOF с малой площадью сердцевины с SMF является использование повторных слабых разрядов дуги с короткой длительностью (рис 4).

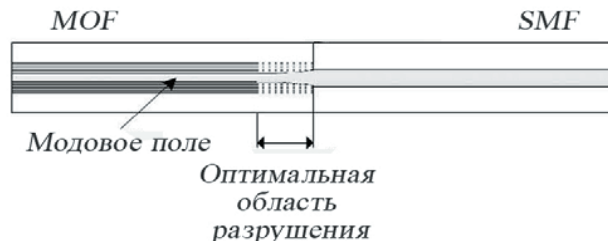


Рисунок 4. Использование повторных разрядов

Данный метод не может быть использован в случае с MOF с малой площадью сердцевины и большими отверстиями, так как модовое поле не будет расширяться, даже при разрушении отверстий.

#### 4. Выводы

В статье рассматриваются проблемы связанные со сваркой MOF и SMF. Исследованы характеристики разрушения воздушных отверстий пяти различных видов микроструктурированного волокна, а также потери, вызванные несоответствием диаметров модовых полей соединяемых волокон. Определено, что в случае подобных диаметров модовых полей MOF и SMF, возможно формирование сварного шва с хорошими механическими характеристиками и с низкими потерями. Разработаны рекомендации по методам выполнения соединений, обеспечивающие минимальные оптические потери.

#### Литература

1. Limin Xiao, M. S. Demokan, Wei Jin, Yiping Wang, Chun-Liu Zhao, «Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect», Journal of lightwave technology, vol. 25, no.11 (2007).
2. J. H. Chong and M. K. Rao, "Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber," Opt. Express, vol. 11, no. 12, pp. 1365–1370 (2003).
3. B. Bourliaguet, C. Pare, F. Emond, A. Croteau, A. Proulx, and R. Vallee, "Microstructured fiber splicing," Opt. Express, vol. 11, no. 25, pp. 3412–3417(2003).
4. А.М. Желтиков Оптика микроструктурированных волокон. М.:Наука, 2004. – 281с.