С. Г. ДЕМЕНТЬЕВ, к. т. н. Н. Т. КЛЮЧНИК,
В. А. КУЗНЕЦОВ, к. т. н. М. Я. ЯКОВЛЕВ

Россия, г. Москва, ЦНИТИ «Техномаш-ВОС»
E-mail: optdevice@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
30.09 2010 г.

Оппонент *д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ*
(ДонНУ, г. Донецк)

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРЫ С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Рассмотрены возможности создания сплавленных одномодовых демультиплексоров с повышенной стойкостью к механическим воздействиям. Исследованы зависимости резонансных частот механических колебаний участка сплавления от конструктивных параметров демультплексоров.

В последние годы широкое распространение получили волоконно-оптические системы передачи (**ВОСП**) со спектральным уплотнением каналов (WDM). Для их построения используются специальные оптические устройства — мультиплексоры/демультиплексоры, представляющие собой спектрально-селективные разветвители. Необходимо отметить, что в качестве мультиплексоров и демультиплексоров используются одни и те же обратимые оптические устройства спектрального уплотнения, которые далее будем называть демультиплексорами.

Из всех типов демультиплексоров наиболее широко применяются двухканальные демультиплексоры с уплотнением по волнам длиной 1310 и 1550 нм, выполненные на основе одномодовых сплавленных биконических разветвителей типа 1×2 [1]. Такие устройства отличаются достаточно высоким уровнем оптических характеристик при относительно низкой стоимости изделий.

В настоящее время двухканальные демультиплексоры начинают активно применять для построения локальных систем передачи информации, а также в аппаратуре различных подвижных объектов. Использование двухканальных демультиплексоров позволяет решить задачу организации дуплексных систем связи с передачей информации по одному оптическому волокну (**ОВ**) одновременно в обоих направлениях.

В зависимости от назначения и места установки демультиплексоры могут подвергаться механическим воздействиям — вибрации и ударам. Такие воздействия наиболее критичны для сплавленных биконических разветвителей из-за хрупкости материала (кварцевого стекла) их световодной структуры.

Анализ характеристик элементной базы ВОСП, выпускаемой в настоящее время рядом зарубежных фирм и отечественных предприятий, показывает, что эксплуатационные характеристики промышленных демультиплексоров не в полной мере соответствуют требованиям устойчивости к механическим воздействиям. Поэтому разработка процессов создания демультиплексоров с повышенной стойкостью к механическим воздействиям является актуальной.

В настоящей работе рассмотрены возможности создания таких демультиплексоров на основе сплавленных одномодовых разветвителей.

Принцип работы и анализ механических характеристик двухканального демультиплексора

Двухканальный одномодовый демультиплексор представляет собой волоконный биконический разветвитель и состоит из двух сплавленных боковыми поверхностями оптических волокон (**рис. 1**). На участке сплавления волокон сформирована общая суженная зона, ограниченная с двух сторон плавными коническими переходами, которая является областью связи [1]. Сплавленная волоконная структура зафиксирована с помощью клеевой композиции на подложке или в капилляре из кварцевого стекла. Биконическая структура на длине l (между зонами фиксации волокон) обычно остается не покрытой защитным полимерным слоем, что необходимо для достижения малых вносимых потерь и требуемого коэффициента изоляции. Уровень оптической мощности, переданной из одного волокна в другое, зависит от длины волны излучения λ_i, передаваемого по i-му волокну, и длины области связи l_f.

Анализ одномодового биконического разветвителя, приведенный в [2], основывается на рассмотрении распространяющихся в нем двух (четной и нечетной) фундаментальных мод [3, 4]. В результате такого анализа определяются значения мощности оптического излучения P_1 и P_2 в выходных каналах разветвителя и коэффициент связи, определяющий степень взаимодействия между собственными модами волновода с постоянным поперечным сечением и постоянным показателем преломления на длине взаимодействия.

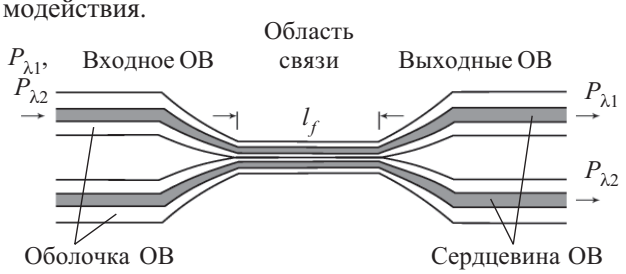

Рис. 1. Схематическое изображение одномодового демультиплексора

Так как для реального сплавленного разветвителя значение l_f фиксировано, а коэффициент связи зависит от длины волны излучения, такой разветвитель будет обладать спектрально-селективными свойствами. Изготавливая разветвитель с областью связи определенной длины, добиваются объединения или разделения волн различной длины.

Оптические волокна, из которых изготавливаются демультиплексоры, могут иметь микротрещины, вызванные технологическими причинами. Вибрационные воздействия обуславливают дополнительные напряжения в структуре кварцевого стекла, что увеличивает микротрещины и приводит к разрушению световодных элементов и, в итоге, к выходу демультиплексора из строя. Наибольшую опасность представляет случай, когда частота вибрации совпадает с собственными частотами колебаний световодных элементов, т. е. когда возникают резонансные явления. Поэтому при проектировании и изготовлении элементов и узлов, подвергаемых вибрационным воздействиям, необходимо обеспечить условие, при котором низшая резонансная частота конструкции превышает верхнюю частоту диапазона внешнего воздействия (обычно 10—2000 Гц).

Одним из путей повышения механической стойкости оптических разветвителей и демультиплексоров на основе сплавленных волокон является заливка биконического участка полимерным материалом с низким показателем преломления. Однако это приводит к изменению заданных оптических параметров устройства и к увеличению их температурной чувствительности. Поэтому в настоящей работе рассмотрены пути повышения механической стойкости демультиплексоров, основанные на выборе оптимальной геометрии биконического перехода и усилия натяжения волокон, обеспечивающих достаточно высокие значения собственных частот механических колебаний сплавленной биконической структуры.

Анализ механических характеристик сплавленной биконической структуры проводился в соответствии с моделью, предложенной в [5]. Такая структура, представленная на **рис. 2**, включает в себя участок длиной l_f с постоянным радиусом поперечного сечения r_f, два участка длиной l_c в виде усеченных конусов с радиусом большего основания r_c. Удлинение Δl обусловлено осевым усилием F, обеспечивающим натяжение сплавленной волоконной структуры.

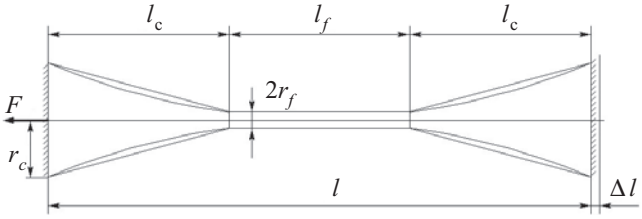

Рис. 2. Модель сплавленной биконической структуры для расчета собственных частот сплавленного разветвителя

Низшая резонансная частота собственных колебаний биконического участка сплавленного разветвителя определяется выражением

$$f_r = \frac{1}{4l^2}\sqrt{\frac{g}{\gamma}\frac{F}{C}},$$

где g — ускорение свободного падения;

γ — удельный вес материала биконической структуры (для кварцевого стекла $\gamma/g = 2{,}245\cdot10^{-9}$ Н·с^2/мм^4);

C — коэффициент, зависящий от геометрических параметров сплавленной биконической структуры.

Анализ зависимостей, приведенных на **рис. 3**, показывает, что для получения достаточно больших значений собственных частот в сплавленной биконической структуре (свыше 2000 Гц) необходимо при ее формировании обеспечить натяжение с усилием не менее 0,2 Н. При радиусе r_f = 10 мкм относительное удлинение центральной части биконической структуры составит $\Delta l_f / l_f > 0{,}9\%$ при величине механического напряжения более 670 МПа. Достаточно высокие значения указанных характеристик делают весьма проблематичным обеспечение надежности сплавленной биконической структуры.

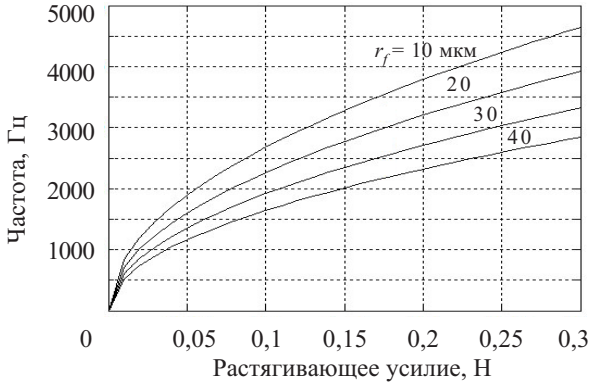

Рис. 3. Расчетная зависимость собственной частоты колебаний биконического участка сплавленного разветвителя от растягивающего усилия для различных значений r_f при l = 38,5 мм и l_f = 11,5 мм

Увеличения резонансной частоты механических колебаний конструкции сплавленных демультиплексоров, а следовательно, и повышения их стойкости к вибрационным воздействиям также можно достигнуть при меньших значениях усилия натяжения за счет уменьшения длины сплавленного биконического участка. Однако при этом существуют ограничения, обусловленные возрастанием вносимых потерь.

Экспериментальные исследования

Изготовление экспериментальных образцов демультиплексоров проводилось на установке, структурная схема которой представлена на **рис. 4**.

Для фиксации оптических волокон *2* используются узлы прижима *3*, установленные на подвижных каретках *4*, осуществляющих растяжку участка сплавления. В качестве высокотемпературного нагревателя *6* используется керамический микронагреватель, что позволяет повысить стабильность температуры в зоне нагрева и улучшить воспроизводимость процесса. Измерение оптической мощности в выходных каналах разветвителя осуществляется с помощью устройства контроля, включающего в себя источник *1* и два приемника излучения *8*.

Для изготовления демультиплексоров использовалось одномодовое оптическое волокно типа SMF-28 с диаметром (сердцевина/оболочка) 8/125 мкм, диамет-

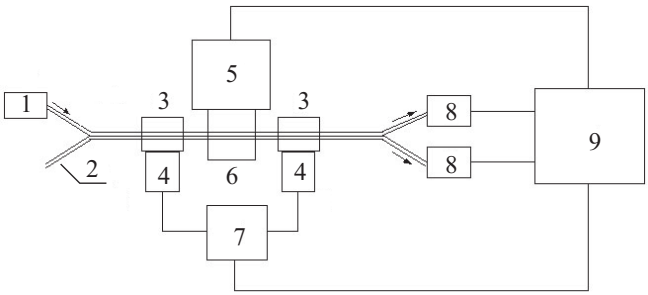

Рис. 4. Структурная схема установки для изготовления сплавленных разветвителей:
1 — источник излучения; *2* — оптические волокна; *3* — узлы прижима волокон; *4* — подвижные каретки; *5* — блок питания нагревателя; *6* — высокотемпературный нагреватель; *7* — блок электропривода; *8* — фотоприемники; *9* — блок управления

ром модового пятна 9,2 мкм на волне длиной 1310 нм и числовой апертурой NA = 0,14.

Основными технологическими параметрами при изготовлении разветвителей являются температура нагрева и скорость растяжения зоны сплавления, задаваемые с помощью блока управления *9*.

Температура нагрева зоны сплавления волокон составляла 1500–1600°С, скорость растяжения выбиралась в пределах от 10 до 60 мкм/с.

После завершения процесса формирования демультиплексора сплавленный участок волокон закреплялся на подложке из кварцевого стекла с помощью акриловой полимерной композиции с добавлением наполнителя, обеспечивающего низкое значение температурного коэффициента расширения. При этом путем выбора места фиксации волокон обеспечивалась заданная длина l свободного от полимерной композиции биконического участка. При фиксации волокон на подложке также контролировалось усилие натяжения F.

В соответствии с приведенной методикой были изготовлены экспериментальные образцы демультиплексоров с различной длиной биконического участка l при фиксированном значении усилия натяжения F.

Для определения резонансных частот механических колебаний сплавленного участка демультиплексора использовался вибростенд, обеспечивающий вибрационное воздействие на исследуемый образец в диапазоне частот 0—11000 Гц.

Результаты исследований конструкции демультиплексора при усилии натяжения 0,01 Н, исходной длине биконического участка 50 мм приведены на **рис. 5**.

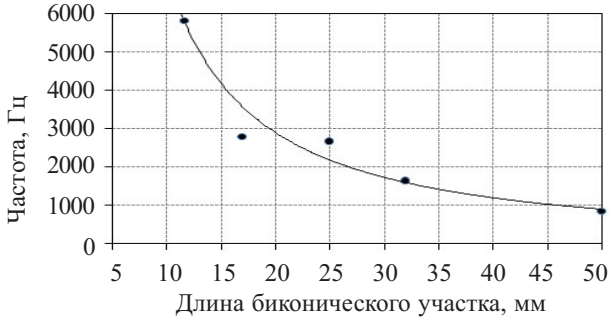

Рис. 5. Экспериментальная зависимость собственной частоты механических колебаний конструкции демультиплексора от длины биконического участка

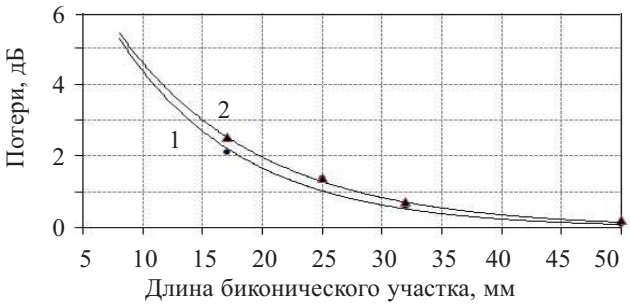

Рис. 6. Экспериментальная зависимость потерь, вносимых демультиплексором, от длины биконического участка для канала волны длиной 1310 мкм (*1*) и 1550 мкм (*2*)

Одной из основных хаактеристик демультиплексора являются вносимые им потери мощности. Зависимость таких потерь от длины биконического участка представлена на **рис. 6**.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что путем уменьшения длины биконического участка за счет уменьшения расстояния между зонами фиксации волокон можно повышать резонансную частоту механических колебаний конструкции демультиплексора. В частности, при усилии натяжения волокон 0,01 Н уменьшение длины биконического участка до 27 мм позволило повысить значение собственной частоты механических колебаний от 900 до 2000 Гц. При этом вносимые потери увеличились всего на 0,8 дБ. Коэффициент оптической изоляции изменялся в пределах 17—19 дБ. Дальнейшее уменьшение длины биконического участка, соответствующее возрастанию собственной частоты механических колебаний, приводило к резкому возрастанию потерь.

Стойкость демультиплексоров с уменьшенной длиной биконического участка к воздействию вибрации с виброускорением до 20g в диапазоне частот от 10 до 2000 Гц подтверждена экспериментально.

***

Проведенный анализ механических характеристик сплавленных биконических структур волоконно-оптических двухканальных демультиплексоров позволил определить пути повышения их стойкости к механическим воздействиям, а также увеличения собственной частоты механических колебаний конструкции демультиплексоров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Рождественский Ю. В. Сплавные волоконно-оптические мультиплексоры/демультиплексоры и их применение в телекоммуникационных системах // Фотон-экспресс.— 2004.— №1.— С. 16—18. [Rozhdestvenskii Yu. V. // Foton-ekspress. 2004. N1. S. 16]

2. Дементьев С. Г., Ключник Н. Т., Кузнецов В. А., Яковлев М. Я. Волоконно-оптические демультиплексоры для систем передачи информации // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2010.— № 2.— С. 43—46. [Dement'ev S. G., Klyuchnik N. T., Kuznetsov V. A., YAkovlev M. YA. // Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature. 2010. N 2. P. 43]

3. Иванов А. Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения.— М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. [Ivanov A. B. Volokonnaya optika. Komponenty, sistemy peredachi, izmereniya. M. Kompaniya SAIRUS SISTEMS, 1999]

4. Marcuse D. Theory of dielectric optical wave-guides.— Boston: Academic Press, 1991.

5. Suhir E. Vibration frequency of a fused biconical taper (FBT) lightwave coupler // Journal of lightwave technology.— 1992.— Vol. 10, N 7.— P. 898—902.