

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  
20.11 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. С. СИТНИКОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

*Представлена технология изготовления сплавленных одномодовых мультиплекторов/демультиплекторов с повышенным коэффициентом оптической изоляции (до 60 дБ) и низкими потерями.*

В последние годы широкое распространение получили волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) информации, основанные на спектральном уплотнении каналов с разделением по длине волны (WDM). Для их построения используются специальные оптические устройства — мультиплексоры/демультиплексоры, представляющие собой разветвители спектрально-селективного вида. Необходимо отметить, что в качестве мультиплексоров и демультиплексоров используются одни и те же обратимые оптические устройства спектрального уплотнения, которые далее будем называть демультиплексорами.

В основе работы демультиплексора лежит принцип спектральной селекции по длине волны, которая может осуществляться двумя способами: на основе дифракции и на основе интерференции. Демультиплексоры на основе дифракции используют элементы с угловой дисперсией, такие как дифракционные решетки, которые пространственно разделяют волны разной длины (каналы) по элементам линейки фотодетекторов или торцам оптических волокон [1]. Демультиплексоры на основе интерференции используют свойства таких устройств как спектрально-селективные сплавленные разветвители и оптические фильтры.

В настоящее время демультиплексоры начинают активно применяться для построения локальных систем передачи информации, а также в аппаратуре различного рода подвижных объектов. Так, например, часто стоит задача организации дуплексных систем связи с передачей информации по одному оптическому волокну одновременно в обоих направлениях. В таких системах применяются двухканальные демультиплексоры с уплотнением по волнам длиной 1310 и 1550 нм.

Среди различных типов двухканальных WDM-устройств широкое применение находят демультиплексоры на основе сплавленных одномодовых разветвителей типа 1×2. Такие устройства отличаются достаточно высоким уровнем оптических характеристик и относительно низкой стоимостью.

Основными требованиями к демультиплексорам являются высокий коэффициент оптической изоляции каналов при демультиплексировании и малые значения вносимых потерь. Кроме того, необходима достаточная стойкость к воздействию внешних факторов, в частности к изменению температуры в широком диапазоне от –60 до +85°С.

Анализ характеристик элементной базы ВОСП, выпускаемой в настоящее время рядом зарубежных фирм и отечественных предприятий, показывает, что характеристики промышленных демультиплексоров не в полной мере соответствуют указанным требованиям. Поэтому является актуальной разработка и создание демультиплексоров с улучшенными оптическими характеристиками и повышенной стойкостью к внешним воздействиям. В настоящей работе предлагается технология изготовления таких демультиплексоров на основе сплавленных одномодовых разветвителей.

### Принцип работы одномодового сплавленного демультиплексора

Структура двухканального одномодового демультиплексора приведена на рис. 1. Такие устройства изготавливают по технологии биконических разветвителей — производится сплавление двух кварцевых световодов в зоне нагрева и растяжение сплавленного участка. В результате формируется рабочая область демультиплексора — общая суженная зона, ограниченная с двух сторон плавными коническими переходами, которая является областью связи [2]. Уровень мощности, переданной из одного оптического волокна (ОВ) во второе, зависит от длины волны  $\lambda_i$  излучения, передаваемого по  $i$ -му волокну, и длины области связи  $L$ .

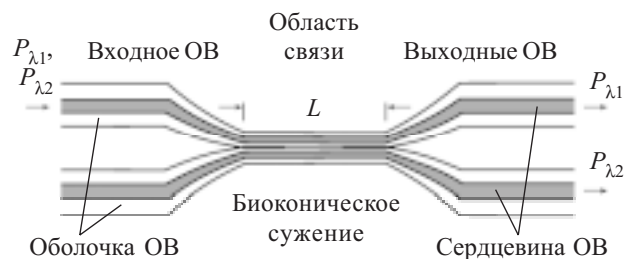


Рис. 1. Схематическое изображение сплавленного демультиплексора

Анализ одномодового биконического разветвителя обычно 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:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0 \cos^2[C(\lambda)L] \\ P_2 &= P_0 \sin^2[C(\lambda)L] \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P_0$  — входная мощность;  
 $C(\lambda)$  — коэффициент связи.

Коэффициент связи, определяющий степень взаимодействия между собственными модами волновода с постоянным поперечным сечением и постоянным показателем преломления (ПП) на длине взаимодействия, рассчитывается по формуле

$$C(\lambda) = \frac{3\pi\lambda}{32n_{cl}a^2} \left[ \left( 1 + \frac{1}{V(\lambda)} \right)^2 + \left( 1 + \frac{n_{air}^2}{n_{cl}^2} \frac{1}{V(\lambda)} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $2a$  — диаметр перетяжки (области связи);  
 $n_{cl}, n_{air}$  — показатели преломления кварцевой оболочки и окружающей перетяжку среды, соответственно;  
 $\lambda$  — длина волны оптического излучения.

Параметр  $V(\lambda)$  определяется выражением

$$V(\lambda) = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{cl}^2 - n_{air}^2}. \quad (3)$$

Из приведенных соотношений видно, что величина оптической мощности в выходных каналах сплавленного разветвителя зависит от длины и диаметра перетяжки, длины волны излучения и ПП кварцевой оболочки и среды, окружающей перетяжку. Так как для реального сплавленного разветвителя значение  $L$  фиксировано, а коэффициент связи  $C$  зависит от длины волны излучения, такой разветвитель будет обладать спектрально-селективными свойствами.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента деления мощности от длины перетяжки для излучения с длиной волны 1310 и 1550 нм [5].

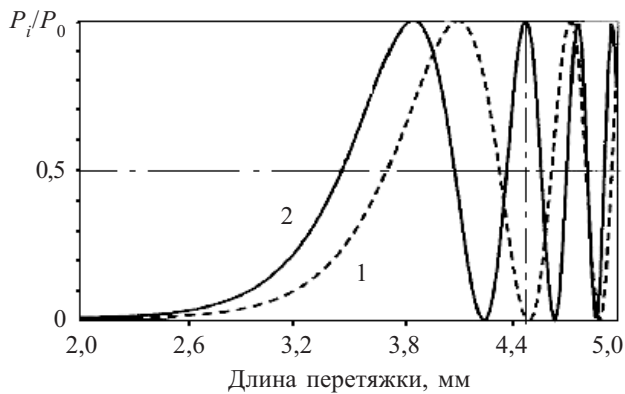


Рис. 2. Зависимость относительной мощности оптического излучения  $P_i/P_0$  в выходном канале демультиплектора от длины перетяжки для волн длиной 1310 нм (1) и 1550 нм (2)

Как видно из рисунка, при определенной длине перетяжки достигается разделение волн различной длины, т. е. режим демультиплексирования. Таким образом, изготавливая разветвитель с областью связи определенной длины, добиваются объединения или разделения волн различной длины.

Основными характеристиками демультиплектора являются вносимые им потери мощности  $A$  и коэффициент изоляции  $K_{из}$ . Для двухканального устройства они определяются следующими выражениями:

$$A = 10 \lg \frac{P_0}{P_i}; \quad K_{ис} = 10 \lg \frac{P_0}{P_j}; \quad i, j = 1, 2, \quad (4)$$

где  $P_0$  — оптическая мощность во входном канале на длине волны  $\lambda_i$ ;  
 $P_i$  — оптическая мощность на выходе  $i$ -го канала на длине волны  $\lambda_i$ ;  
 $P_j$  — оптическая мощность в  $j$ -ом канале на длине волны  $\lambda_j$ .

С целью повышения коэффициента изоляции используется каскадное соединение демультиплекторов, показанное на рис. 3.

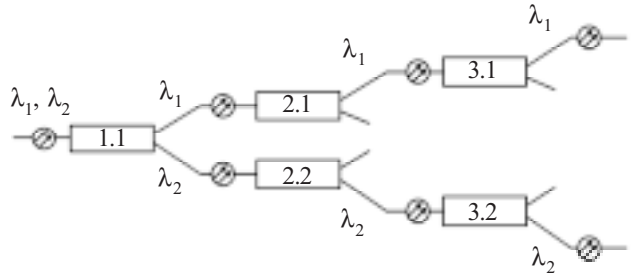


Рис. 3. Каскадный демультиплектор с повышенным коэффициентом оптической изоляции ( $N=3$ )

В этом случае характеристики демультиплектора определяются как

$$A = \sum_{m=1}^N A_m + (N-1)A_{св}; \quad K = \sum_{m=1}^N K_m, \quad (5)$$

где  $N$  — число последовательно соединенных звеньев в каскаде демультиплекторов;  
 $A_m$  и  $K_m$  — вносимые потери и коэффициент изоляции демультиплектора с номером  $m$ , соответственно;  
 $A_{св}$  — потери в сварном соединении волокон.

### Методика изготовления демультиплекторов

Технология изготовления демультиплекторов аналогична технологии изготовления сплавленных волоконных разветвителей и основана на сплавлении двух одномодовых волокон с одновременной растяжкой зоны соединения (рис. 4) с целью получения

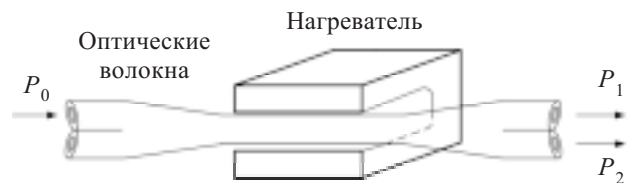


Рис. 4. Метод изготовления сплавленных волоконных демультиплекторов

плавного биконического перехода, необходимого для оптической связи между волокнами [2].

Очищенные от защитного покрытия поверхности участков оптических волокон соединяются между собой, закрепляются на подвижных каретках устройства растяжки и помещаются в нагреватель. После нагрева до температуры, обеспечивающей сплавление волокон, производится растяжка зоны сплавления с целью получения плавного биконического перехода. Основными технологическими параметрами при изготовлении разветвителей являются температура нагрева волокон и скорость растяжения зоны сплавления. Для обеспечения плотного соединения волокон между собой может использоваться их скрутка вокруг продольной оси.

В процессе растягивания зоны сплавления изменяются текущие значения мощности излучения  $P_1$  и  $P_2$  в выходных портах. Процесс останавливается после некоторого заданного количества осцилляций выходной оптической мощности, когда мощность в одном из выходных каналов достигает минимального значения.

Сформированная таким образом сплавленная структура закрепляется на подложке из кварцевого стекла при помощи акриловой полимерной композиции с добавлением наполнителя, обеспечивающего низкое значение температурного коэффициента расширения. Для последующей герметизации такая структура помещается в металлический цилиндрический корпус диаметром 3 мм и длиной 65 мм.

#### Экспериментальные исследования

Изготовление демультиплекторов осуществлялось на установке для производства разветвителей FCI-0201 фирмы NTT AT (Япония). В ней для нагрева волокон используется керамический микронагреватель, обеспечивающий высокую стабильность температуры в зоне нагрева, что улучшает воспроизводимость процесса. Для изготовления использовалось одномодовое оптическое волокно типа SMF-28 с диаметром (сердцевина/оболочка) 8/125 мкм, диаметром модового пятна 9,2 мкм на длине волны 1310 нм и числовой апертурой  $NA=0,14$ .

В результате отработки технологии были определены оптимальные температурно-временные параметры процесса. Температура нагрева зоны сплавления

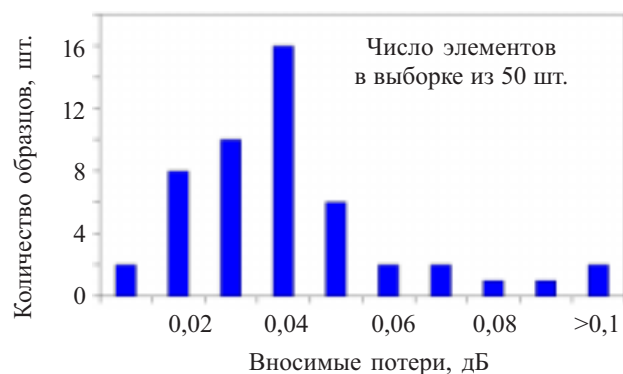


Рис. 5. Гистограмма распределения потерь, вносимых демультиплекторами

волокон составляла 1500—1550°C, скорость растяжения  $v(t)$  выбиралась не выше 60 мкм/с.

На рис. 5 приведена гистограмма распределения вносимых демультиплекторами потерь мощности, полученная на основе измерения характеристик образцов в партии из 50 шт. Анализ гистограммы показывает, что вносимые изготовленными образцами потери не превышают 0,1 дБ, причем более 80% от общего количества разветвителей имеют потери, не превышающие 0,05 дБ.

Коэффициент оптической изоляции каналов демультиплектора составлял 18—20 дБ. Для получения более высоких значений коэффициента изоляции использовалось каскадное соединение трех звеньев демультиплекторов в соответствии с рис. 3. Соединение волоконных выводов демультиплекторов производилось методом сварки с использованием промышленного аппарата для сварки оптических волокон. Экспериментально полученная гистограмма распределения вносимых сварным соединением потерь приведена на рис. 6. Среднее значение потерь составило 0,03 дБ.

Потери, вносимые трехзвенным каскадным демультиплектором, включающие суммарные потери в трех сплавленных демультиплекторах и в двух сварных соединениях, составили не более 0,4 дБ. Типичная спектральная характеристика такого демультиплектора приведена на рис. 7.

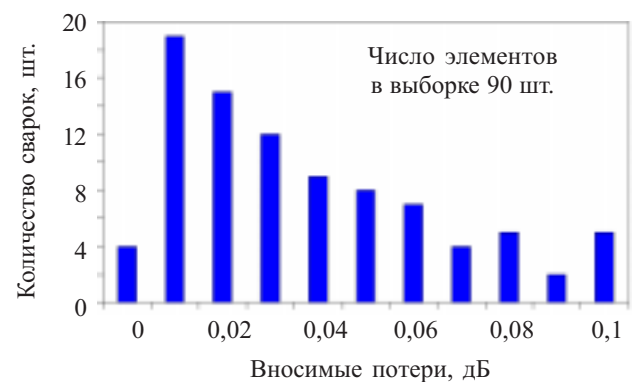


Рис. 6. Гистограмма распределения потерь, вносимых сварным соединением, при создании демультиплектора с повышенной оптической изоляцией

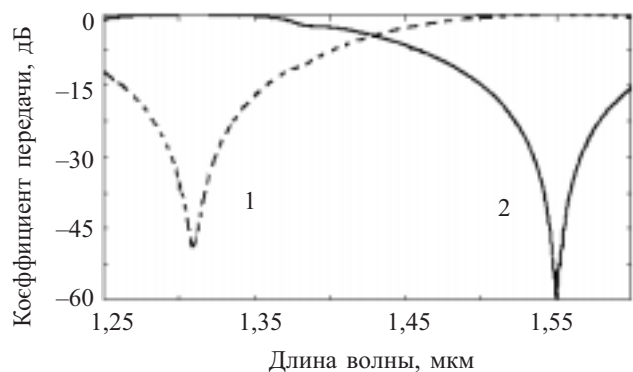


Рис. 7. Спектральная характеристика каскадного демультиплектора, состоящего из трех звеньев, для канала волны длиной 1550 нм (1) и 1310 нм (2)

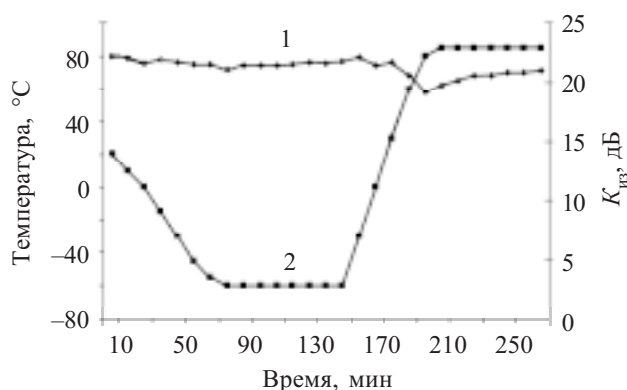


Рис. 8. Изменение коэффициента оптической изоляции  $K_{из}$  (1) соответственно изменению температуры (2) демультиплексора

Как видно из графика, малая величина вносимых потерь сохраняется в широком спектральном интервале ( $\pm 50$  нм). Узкие минимумы на спектральных зависимостях соответствуют коэффициентам оптической изоляции.

Были проведены испытания демультиплексоров на стойкость к температурным воздействиям, которые включали в себя испытания на воздействие максимально повышенной ( $+85^\circ\text{C}$ ) и максимально пониженной температуры среды ( $-60^\circ\text{C}$ ). Изменение величины вносимых потерь в указанном диапазоне температуры не превышало 0,1 дБ, а минимальное значение коэффициента оптической изоляции составило

20 дБ. Типичная картина изменения коэффициента оптической изоляции от температуры, полученная экспериментально, приведена на рис. 8.

\*\*\*

Таким образом, на основе проведенного анализа функционирования и метода изготовления сплавленных одномодовых мультиплексоров/демультиплексоров были созданы образцы с повышенным коэффициентом оптической изоляцией каналов (до 60 дБ) и с потерями, не превышающими 0,4 дБ. Экспериментально подтверждена их устойчивость к изменению температуры среды от  $-60$  до  $+85^\circ\text{C}$ .

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Берикашвили В. Ш., Ключник Н. Т., Костенко К. Н., Яковлев М. Я. Интегрально-оптические волноводные дисперсионные элементы для ВОЛС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 2.— С. 10—16.
2. Рождественский Ю. В. Сплавные волоконно-оптические мультиплексоры/демультиплексоры и их применение в телекоммуникационных системах // Фотон-экспресс.— 2004.— № 1.— С. 16—18.
3. Иванов А. Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения.— М.: Компания Сайрус системс, 1999.
4. D. Marcuse. Theory of dielectric optical wave-guides.— Boston: Academic Press, 1991.
5. Ключник А. Н., Костенко К. Н., Фаловский В. Ф., Яковлев М. Я. Одномодовые спектрально-селективные разветвители для систем передачи информации // Матер. 12 Междунар. науч.-технич. конф. «Высокие технологии в промышленности России».— М.: ЦНИТИ «Техномаш».— 2006.— С. 305—310.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Нефедов А. В. Взаимозаменяемые интегральные схемы.— М.: РадиоСофт, 2009.— 352 с.**

В справочнике представлены интегральные схемы, выпускаемые в странах СНГ и Прибалтики, и их зарубежные аналоги. Приведены функциональные назначения, электрические параметры, изготовители, номера технических условий, типы корпусов. Для инженерно-технических работников и радиолюбителей, занимающихся разработкой, эксплуатацией и ремонтом радиоэлектронной аппаратуры.

**Черепанов В. П. Диоды и их зарубежные аналоги.— М.: РадиоСофт, 2009.— 632 с.**

В четвертый, дополнительный, том издания вошли справочные сведения о новых приборах, запущенных в серийное производство отечественными заводами-изготовителями после 2000 года. Приводятся электрические и эксплуатационные характеристики полупроводниковых приборов — выпрямительных диодов и столбов, диодных сборок, блоков модулей, матриц, стабилизаторов и ограничителей напряжения, а также охладителей для силовых диодов. Приведена также классификация и система обозначений, основные стандарты для описанных в справочнике приборов, сведения об их основном назначении, габаритных и присоединительных размерах и маркировке. В приложении представлены зарубежные аналоги полупроводниковых диодов и названия фирм-изготовителей, а также перечень полупроводниковых диодов, вошедших в четыре тома. Для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой, эксплуатацией и ремонтом радиоэлектронной аппаратуры.

