

ОПТИЧЕСКИЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ И ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРЫ СИСТЕМ WDM

Из всех технологий цифровых волоконно-оптических сетей передачи (ВОСП) наиболее быстро, благодаря простоте и востребованности предлагаемых решений, развивались в последнее время технологии WDM и CWDM. Современное состояние этих технологий было представлено в нашем разделе "Оптоэлектронные системы" журнала "Электроника: НТБ" (№6 – WDM и №7 – CWDM за этот год). Естественным продолжением было бы описание основных функциональных устройств, используемых в этих системах. Некоторые из них были отражены в нашем журнале, другие предстоит рассмотреть, чтобы читатели получили законченное представление о системах WDM.

К таким устройствам относятся: модуляторы, демодуляторы и волновые конверторы (см. "Электроника: НТБ, 2000, №6), мультиплексоры и демуплексоры (см. настоящую статью), оптические фильтры (см. "Электроника: НТБ", 2001, №1), интерливеры (или устройства прореживания каналов) и деинтерливеры, оптические мощные усилители (бустеры) и предусилители, передающие и приемные устройства (лазерные диоды и СИД), а также устройства помехоустойчивого кодирования.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных операций в системах WDM – мультиплексирование-демультиплексирование оптических несущих. Параметром, по которому она осуществляется, является длина волны, поэтому данная операция (а вместе с ней и технология WDM в целом) носит название операции оптического **мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM)**, или, более кратко, **операции волнового мультиплексирования**.

Эта операция делится на два этапа: этап мультиплексирования и этап демультиплексирования.

Операция оптического мультиплексирования математически описывается функцией суммирования: $\sum_{i=1}^n$, где \sum – модулированные оптические несущие ($i = 1, 2, \dots, n$), спектры которых не перекрываются и шаг между номинальными центральными частотами постоянен. При этом процесс суммирования может осуществляться последовательно с использованием функции **пространствен-**

ного интерливинга (перемежения, или чередования, несущих). Она напоминает функцию *временного интерливинга* [1] и позволяет решать, например, задачу мультиплексирования 80 (или n) несущих с шагом по сетке частот WDM 50 ГГц (или h) последовательно в два этапа. На первом этапе мультиплексируются две группы по 40 (или $n/2$) несущих, включающих все четные (первая группа) и все нечетные (вторая группа) несущие, расположенные в своих группах с шагом 100 ГГц (или $2h$). На втором этапе две полученные группы мультиплексируются (суммируются) вместе. Указанная операция может быть также осуществлена и в 4 этапа, при этом на первом этапе формируются (мультиплексируются) 4 группы с числом несущих $n/4$ и шагом несущих в группе $4h$. Могут быть использованы и другие варианты. Реализация указанной функции, осуществляемая устройствами интерливинга, или **интерливерами**, используется достаточно широко в системах WDM с большим числом несущих, так как позволяет снизить требование на максимальное число одновременно мультиплексируемых несущих и упростить мультиплексоры.

В соответствии со стандартами [2] и IEC 61931-1 (6.52), "волновой мультиплексор (MUX) – это устройство ветвления с двумя или большим числом входных портов и одним выходным портом, такое где световой поток в каждом порту ограничивается предварительно выбранным диапазоном длин волн, а выход является комбинацией световых потоков этих портов".

Операция оптического демультиплексирования сводится к разделению всех несущих в точке терминирования агрегатного потока WDM. Эта задача является обратной по отношению к задаче мультиплексирования и может быть решена, в принципе, теми же устройствами, если они обладают свойством обратимости, т. е. будучи ($n+1$)-полюсниками (где полюс реализуется входным или выходным оптическим портом), решают задачу мультиплексирования в конфигурации: n входов – 1 агрегатный выход, а задачу демультиплексирования в конфигурации: 1 агрегатный вход – n выходов при замене выходного полюса (для оптических устройств агрегатного выходного порта) на входной, а входных полюсов (портов) на выходные. Таким свойством обладают большинство пассивных мультиплексоров-демультиплексоров, что делает универсальным их использование и позволяет анализировать только процесс демультиплексирования.

В соответствии со стандартами [2] и IEC 61931-1 (6.53), "волновой демультиплексор (DEMUX) – это устройство, которое выполняет операцию, обратную по отношению к мультиплексору, такое где вход является оптическим сигналом, объединяющим два или большее число диапазонов волн, а выход каждого порта соответствует различным предварительно выбранным диапазонам длин волн".

Н. Слепов
nslepov@online.ru



ТЕХНОЛОГИИ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ

Агрегатный оптический сигнал, полученный в результате мультиплексирования, можно представить в виде *амплитудно-волновой* (АВХ) или *амплитудно-частотной* (АЧХ) характеристик гребенчатого фильтра, где каждый зубец гребенки – это АВХ или АЧХ модулированной несущей. Центральные номинальные частоты несущих f_{0n} такой гребенки в системах WDM (DWDM) соответствуют сетке частот, рекомендованной стандартами [3, 4], с постоянным шагом h , определяющим разнос несущих. Причем сетка стандарта [2], определенная для опорной частоты 193,1 ТГц и минимального шага 50 ГГц, была (начиная с 2002 года) уплотнена до 12,5 ГГц и перенесена в рекомендацию [4]. В результате каждой несущей может выделяться окно $(f_{0n}-h/2, f_{0n}+h/2)$ шириной h ГГц, выбираемое из следующего ряда, ГГц: 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 600; 1000.

Последний шаг 1000 ГГц соответствует разному по длине волны примерно 8 нм в окне 1550 нм, тогда как первый – соответствует 0,1 нм, что сравнимо с температурными флуктуациями частот несущих, генерируемых лазерами. Для того чтобы перекрыть такой широкий диапазон значений, используются различные технологии (или устройства) демультиплексирования.

В 1996–1999 годах произошел существенный прорыв в технологии мультиплексирования, обусловленный, с одной стороны, переходом к *интегральным оптическим технологиям*, с другой – миниатюризацией и улучшением качества изготовления элементов традиционной дискретной оптики и появлением *промышленной микрооптики*. В результате стало возможным разделить все демультиплексоры на два больших класса: демультиплексоры на *микрооптических устройствах* и на *оптоволоконных направленных разветвителях* (ОВНР) [5].

Первый класс демультиплексоров использует микрооптику для реализации двух основных технологий мультиплексирования, основанных на разделении несущих с помощью фильтрации на основе *интерференционных фильтров* и *явления угловой дисперсии*.

Нужно отметить, что эти технологии в целом отличаются от технологий фильтрации, рассмотренных в работе [6] применительно к мультиплексорам ввода-вывода, тем, что они нацелены на одновременную фильтрацию не единиц, а большого числа каналов, несущие которых разнесены по сетке с постоянным шагом.

Для *разреженных систем WDM (CWDM)*, согласно рекомендации [7], напротив, используется не частотный, а волновой план с постоянным и единственным шагом сетки 20 нм. Можно сказать, что для них демультиплексирование (разделение) несущих не составляет проблем при использовании даже традиционных методов оптической фильтрации, например многослойных фильтров на тонких пленках [6].

Что касается "нового класса" *широкополосных систем WDM (WWDM)*, то они по определению не имели проблем демультиплексирования, так как использовали разнос несущих больше 20 нм [2]. Это дало возможность мультиплексировать 2–4 несущие в одном волокне в окне прозрачности 1310 нм уже в 1987–1990 годах [8].

ТЕХНОЛОГИИ ДЕМУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ СИСТЕМ WDM И DWDM

Итак, действительно проблемными с точки зрения демультиплексирования могут быть только системы WDM, плотные WDM (DWDM) и высокоплотные WDM (HDWDM), последний класс в рекомендации [2] не выделен. Причем эти проблемы растут обратно пропорционально используемому шагу между несущими и переходному затуханию АЧХ соседних несущих.

На основе вышеизложенного можно составить следующую классификацию технологий DEMUX:

1. DEMUX на основе объемных микрооптических устройств, использующих:

- а) интерференционные фильтры
 - на основе резонатора Фабри-Перо (FP),
 - на многослойных диэлектрических тонких пленках (DTF),
 - на отражательных оптоволоконных решетках Брэгга (FBG);
- б) явление угловой дисперсии
 - в трехгранной призме,
 - на дифракционной решетке.

2. DEMUX на основе планарных интегральных устройств, использующих:

- а) оптоволоконные направленные разветвители (ОВНР);
- б) интерферометры Маха-Цендера (MZI);
- в) дифракционную решетку, реализованную на массиве волноводов (AWG).

1а. Технология мультиплексирования на основе интерференционных фильтров

Технология (де)мультиплексирования на основе интерференционных фильтров – наиболее старая и распространенная, так как использует известные принципы работы резонатора Фабри-Перо, состоящего из двух параллельных зеркал и прозрачной непоглощающей диэлектрической среды между ними (более подробно о его функционировании и характеристиках см. [1, 6]). Резонатор, как и любой интерференционный фильтр, настраивается на фильтрацию одной длины волны. Он разделяет поток $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ на два потока: λ_1 и $\lambda_2, \dots, \lambda_n$, выделяя несущую λ_1 из многоволнового потока, и для демультиплексирования n несущих необходимо установить каскадно n фильтров.

Аналогично резонатору FP работает и *фильтр на многослойных диэлектрических тонких пленках*. И в этом случае для демультиплексирования n несущих необходимо установить каскадно n фильтров (более подробно о функционировании и характеристиках фильтра см. [1, 6]).

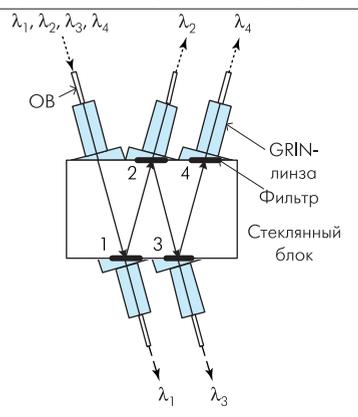
Обобщенная схема такого демультиплексора на 4 длины волны приведена на рис.1. Из рисунка видно, что интерференционные

фильтры (FP или DTF) сформированы по обе стороны стеклянного блока (плоскопараллельной пластины, служащей для отражения не проходящего через фильтр потока) и снабжены специальными линзами для коллимации и фокусировки светового потока. В данной конструкции для этой цели используются так называемые *оптоволоконные GRIN-линзы*. Нужно учитывать, что затухание таких фильтров на центральной частоте полосы пропускания

Рис.1. Схема демультиплексора WDM на интерференционных фильтрах

достаточно велико, что делает целесообразным их использование в WDM с 8–16 каналами.

Другой принцип использован в фильтрах с циркулятором и отражательными ОВ-решетками Брэгга. Здесь отражение волны определенной длины происходит от дифракционной решетки Брэгга соответствующего периода, сформированной в одномодовом ОВ. Отраженная волна, пришедшая на порт 2, транслируется циркулятором на порт 3 (рис. 2). Так как решетка Брэгга рассчитана на фиксированную



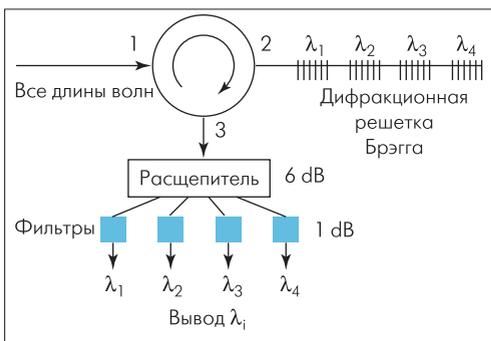


Рис.2. Схема демultipлексора WDM на основе отражательной решетки Брэгга

на 4 длины волны и приведена на рис. 2, более подробно о его функционировании и характеристиках – в работах [1, 6].

16. Технология мультиплексирования на основе явления угловой дисперсии

Эта технология использует совершенно другие физические принципы. Здесь входной коллимированный пучок падает на *диспергирующий элемент* и пространственно разделяется им на несколько пучков, в зависимости от длины волны несущей. Эти пучки, расходящиеся под различными углами, фокусируются и собираются отдельными *приемными оптическими элементами*. На выходе (в фокальной плоскости) этих элементов формируются изображения входного пучка, размеры которых (с помощью микролинзовых систем) юстируются так, чтобы они соответствовали диаметру сердцевины приемного (выходного) ОВ. Существует ряд проблем в получении нужного четкого изображения выходного пучка, они рассмотрены в работе [5].

В качестве диспергирующих элементов могут быть использованы:
 • *призмы*, как проходные, так и отражательные (причем *схема Литтроу* (Littrow) [1] более предпочтительна, так как позволяет использовать один комплект линз и уменьшить габариты устройств, см. рис. 3);

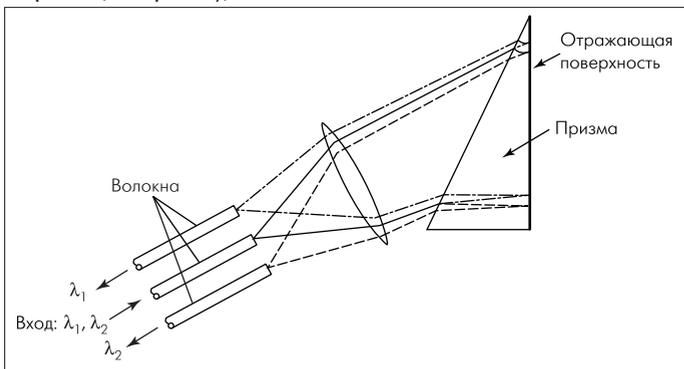


Рис. 3. Схема демultipлексора WDM на отражательной призме по схеме Литтроу

• *дифракционные решетки* (плоская, отражательного типа) как с разделением входного и выходного пучков, так и с их совмещением (вновь используется схема Литтроу, рис. 4).

Дифракционные решетки нашли наиболее широкое применение в качестве демultipлексоров WDM такого типа. Устройства, основанные на них, можно разделить по конструкции на две категории:

- *плоские линейные решетки с отдельными фокусирующими элементами;*
- *самофокусирующиеся системы с решетками.*

Наиболее удачной конструкцией первого типа можно считать *цилиндрическую GRIN-линзу* с наклонной плоской дифракционной ре-

длину волны, то для демultipлексирования *l* несущих необходимо сформировать каскад из *l* отражательных решеток Брэгга, настроенных на соответствующие длины волн.

Схема такого демultipлексора

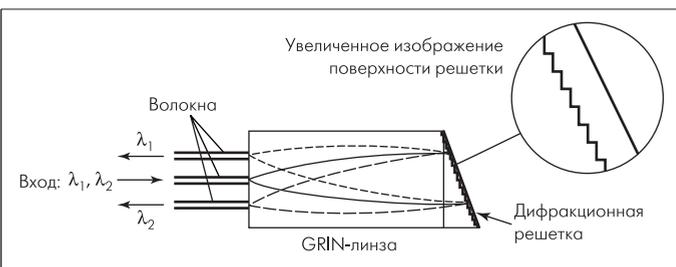


Рис.4. Схема демultipлексора WDM на отражательной плоской решетке по схеме Литтроу

шеткой (на стороне, противоположной входу, см. рис. 4). В числе конструкций второго типа можно отметить ряд удачных (все используют схему Литтроу), среди которых (см. подробно в работе [5]):

- а) схема, использующая для самофокусировки *двояковогнутую* (в двух перпендикулярных плоскостях) дифракционную решетку;
- б) схема, использующая для самофокусировки *вогнутую* (в одной плоскости) *цилиндрическую дифракционную решетку* и *планарные волноводы*;
- в) схема, использующая для коллимирования и самофокусировки *вогнутое зеркало* и *плоскую дифракционную решетку* (далее – как схема 3DO).

Названные три технологии, были разработаны еще в 80-х годах [5]. Из них схема (а) из-за сложности в реализации не нашла применения; схема (б) была доработана и известна в настоящее время как схема с *вогнутой дифракционной решеткой* – CG (Concave Grating) [9]; схема в) оказалась значительно более технологичной и известна в настоящее время как схема *трехмерного (объемного) оптического мультиплексирования* – 3DO (3-D Optics WDM) [9]. Мы рассмотрим более подробно последнюю из них как наиболее перспективную.

ТЕХНОЛОГИЯ САМОФОКУСИРОВКИ С ВОГНУТЫМ ЗЕРКАЛОМ И ПЛОСКОЙ РЕШЕТКОЙ

Эта технология, названная в работе [9] технологией *трехмерного оптического мультиплексирования*, использует классическую схему самофокусировки (рис. 5) с *плоской отражательной дифракционной решеткой*, *вогнутым зеркалом* (С) и *массивом волоконных световодов* (ОВ), размещенных в пазах физической решетки с фиксированным шагом.

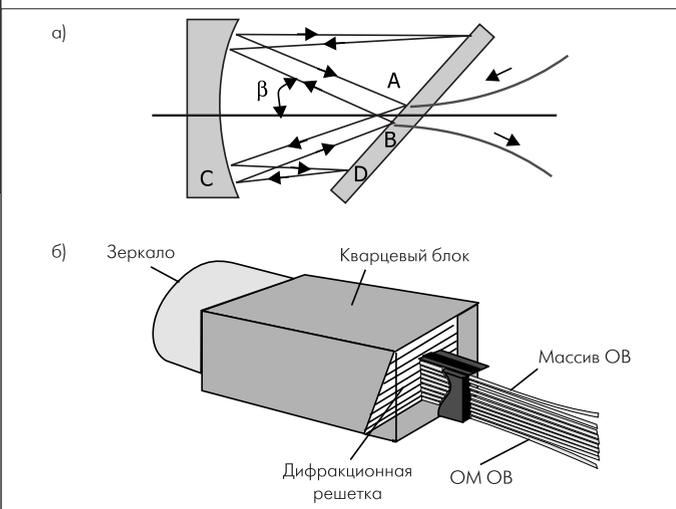


Рис.5. Схема WDM (3DO) на основе трехмерного оптического мультиплексирования: а) оптическая схема мультиплексирования; б) конструкция мультиплексора



Схема ее работы (в режиме демультиплексора) достаточно проста (рис. 5а). Мультиплексированный поток из входного волокна А, расходясь конусом с углом β , отражается от зеркала и падает на дифракционную решетку, отражающую под разными углами свет разной длины волны. Эти дифрагированные лучи, отражаясь от зеркала, фокусируются в определенных точках, где должны быть расположены приемные порты массива волокон, выделяющих соответствующие несущие. Для примера показано выделение одной таковой несущей, конус лучей которой (с тем же углом β) фокусируется в точке В (срез волокна выходного порта).

Все элементы конструкции строго фиксированы в монолитном кварцевом блоке (рис. 5б), что позволяет выдерживать и сохранять высокую точность изготовления. Указанная конструкция может быть использована как с параболическим, так и сферическим зеркалами и имеет коэффициент увеличения, равный 1. Она *афокальна* (т.е. не имеет фокуса), так что все исходящие и входящие в волокна углы одинаковы. Одномодовые волокна укладываются в канавки специальной физической решетки. Конструкция мультиплексора дает возможность использовать в решетке до 131 канавки (канала), что позволяет реализовать оптический шаг <1 нм, или до 262 каналов с шагом $<0,5$ нм [9].

2а. Технология, использующая оптоволоконные направленные разветвители

Несмотря на значительные достижения в области технологии мультиплексирования на основе объемных микрооптических устройств, общая тенденция развития *волоконно-оптических систем передачи* (ВОСП) и отдельных ее устройств (в первую очередь мультиплексоров плотных и высокоплотных WDM) состоит в совершенствовании *планарных технологий*, которые органично сочетались бы с технологиями, используемыми при создании *оптических интегральных схем* (ОИС).

Наиболее простым и легко реализуемым в области планарных технологий вариантом мультиплексора WDM является мультиплексор на *оптоволоконных направленных разветвителях* (ОВНР), схема которого приведена рис. 6. Она построена путем каскадного соединения однотипных ячеек разветвителей типа 2:1 (два входа – один выход), дающего в итоге мультиплексор $n:1$.

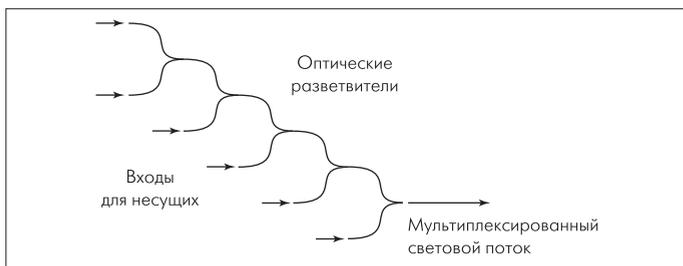


Рис.6. Схема мультиплексора WDM на ОВНР

Такой метод построения схемы имеет очевидный недостаток – высокий уровень *вносимых потерь* (теоретически 3 дБ/каскад). Его можно, конечно, компенсировать высоким уровнем входных оптических сигналов и установкой на выходе оптического усилителя, но такое решение годится только для мультиплексора, но непригодно для демультиплексора, входные уровни сигналов которого малы.

2б. Технология, использующая интерферометры Маха-Цендера

Развитием этого решения является использование интерферометров Маха-Цендера (MZI), см. рис.7 [10], для демультиплексоров

вместо разветвителей. Структура демультиплексора построена по схеме биарного дерева, а значит, она может быть использована для систем WDM с числом несущих, равных величине 2^n .

Явное преимущество этого решения – планарность схем MZI и простота его реализации в виде ОИС.

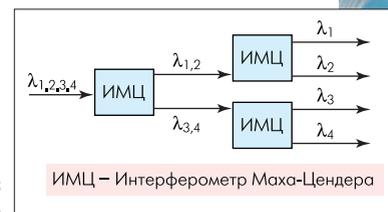


Рис.7. Схема демультиплексора WDM на интерферометрах Маха-Цендера

2в. Технология, использующая дифракционную решетку на массиве волноводов

Принципы, используемые в двух предыдущих решениях, были логически объединены в технологии, основанной на формировании *дифракционной решетки на массиве волноводов* – AWG (Arrayed Waveguide Grating) [11].

В основе технологии AWG (рис. 8а) лежит обобщенный принцип интерферометра Маха-Цендера. Мультиплексор AWG состоит из двух многопортовых разветвителей (входного и выходного), соединенных массивом *планарных оптических волноводов* (МПОВ). Длина каждого волновода L_j отличается от соседних на фиксированную величину ΔL , т.е. $L_j = L_{j-1} + \Delta L$, $L_{j+1} = L_j + \Delta L$. Следовательно, каждую пару волноводов вместе с входным и выходным разветвителями можно рассматривать как интерферометр Маха-Цендера, а AWG в целом – как *обобщенный интерферометр Маха-Цендера*, т.е. устройство, генерирующее n копий входного сигнала (с помощью входного разветвителя), распространяющихся в одинаковых средах различной длины, и складывающее эти сигналы, пришедшие с разными фазовыми сдвигами, на выходе (с помощью выходного разветвителя).

AWG может использоваться как мультиплексор ($n:1$), осуществляющий объединение n входных сигналов с группы входных портов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ в один выходной – λ , или демультиплексор ($1:n$), осуществляющий разбиение входного потока $\lambda = \sum_{j=1}^n \lambda_j$ на отдельные несущие $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ и подачу их на группу выходных портов n .

Схему AWG, конечно, можно было бы реализовать с помощью соединения $n/2$ MZI, однако ее проще было бы сделать в виде планарной схемы с помощью *интегральных оптических технологий*, так как входной и выходной разветвители и массив волноводов можно реализовать на одной кремниевой подложке. Волноводы реализуются в виде *планарных оптоволоконных световодов* (диоксид кремния, легированный Ge или Ta), сформированных на этой же подложке.

Многоканальные AWG (16–64 канала) выпускаются в виде готовых модулей, отличающихся малыми габаритами и средним уровнем вносимых потерь (см. таблицу). Их температурный коэффициент достаточно высок ($0,01$ нм/°С), что требует использования стабилизаторов температуры.

ПРИНЦИП РАБОТЫ МУЛЬТИПЛЕКСОРА AWG

Допустим, что мультиплексор AWG имеет входной $n \cdot m$ и выходной $m \cdot n$ разветвители, соединенные массивом из m световодов, длина которых отличается на ΔL , т.е. $L_{j+1} = L_j + \Delta L$. Входной разветвитель расщепляет сигнал с любого *входного порта* i на m входов массива световодов, предположим, что это будет световод k . Пусть далее выходной разветвитель соединяет любой из m выходов массива световодов с *выходным портом* j . Тогда общий путь,

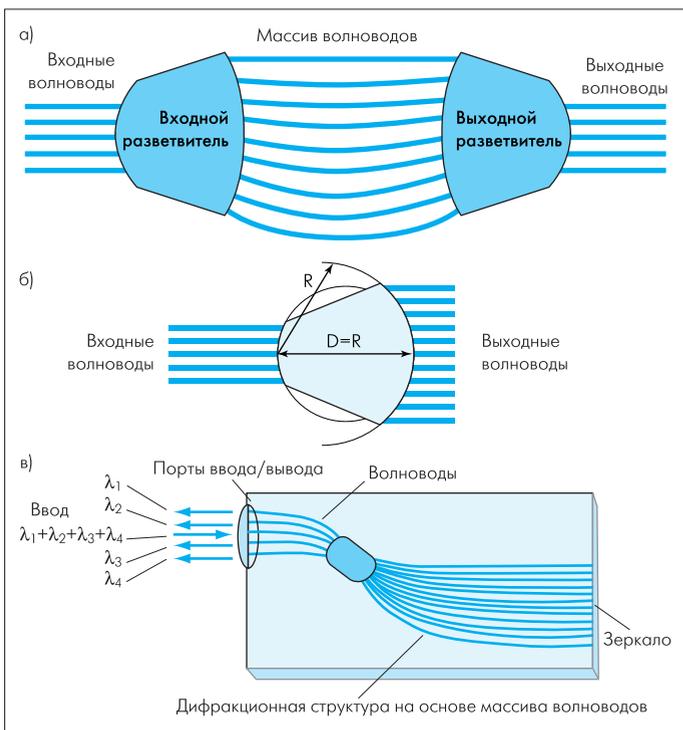


Рис.8. Схема мультиплексирования WDM на основе дифракционной решетки на массиве волноводов: а) схема мультиплексора с входным и выходным разветвителями; б) конструкция входного разветвителя по схеме с кругом Роуланда; в) схема мультиплексора с одним разветвителем и отражающим зеркалом

проходимый светом от порта i до порта j через световод k , равен $D_{ikj} = (d_{ik} + L_k + d_{kj})$. Длина $L_k = L_1 + (k-1)D$, где L_1 – длина минимального (первого) световода.

Пусть, аналогично, длина $d_{ik} = d_i + (k-1)\Delta d_i$, а $d_{kj} = d_j + (k-1)\Delta d_j$, где d_i и d_j – минимальные пути между входными/выходными портами разветвителей и входами/выходами световодов. Тогда относительные фазы сигналов, проходящих от порта i до порта j через любой световод $k = 1, 2, \dots, m$, составят:

$$\varphi_{ikj} = 2\pi n_1(d_i + d_j)/\lambda + 2\pi(k-1) \cdot \{n_1(\Delta d_i + \Delta d_j) + n_2 D\} / \lambda$$

Здесь n_2 и n_1 – коэффициенты преломления материала световодов (n_2) и входного и выходного разветвителей (n_1).

Первое слагаемое в этой формуле постоянно, второе – показывает изменение относительной фазы φ_{ikj} . Те из волн, проходящих по пути D_{ikj} , для которых $\{n_1(\Delta d_i + \Delta d_j) + n_2 D\} = p\lambda$ будут складываться в фазе на выходе j , а следовательно, несущая будет выделена (демуплексирована). Выполнение указанного условия возможно (но для другого λ), если заменить p на $p+1$, т.е. будет выделяться λ и т. д. Это говорит о том, что, во-первых, ABX мультиплексора AWG имеет периодическую, гребенчатую, форму и, во-вторых, все длины волн системы WDM лежат в соответствующем свободном спектральном диапазоне FSR (см. определение в [11]).

Указанные свойства напоминают интерферометрический фильтр на резонаторе Фабри-Перо, а физические принципы работы говорят о том, что массив световодов, длина каждого из которых отличается от длин соседних световодов на D , играет роль дифракционной решетки, что делает понятным его название – мультиплексор на основе дифракционной решетки на массиве волноводов.

Для понимания работы этого широко используемого типа мультиплексоров WDM интересно сделать ряд замечаний, касающихся некоторых деталей кон-

струкции мультиплексора, играющих важную роль в выполнении условий фильтрации (сложения в фазе компонентов сигнала на выходе), поясняемых рис. 8б, а именно [11]:

- входы массива световодов (выходные порты входного разветвителя) лежат на окружности решетки волноводов (OPB) радиуса R с центром в точке входа центрального входного волновода;
- входы других входных волноводов лежат на окружности (вписанной в OPB между ее центром и точкой касания общей касательной) диаметра R , эта окружность называется **кругом Роуланда**;
- шаг распределения входных ОВ и массива световодов постоянен в направлении касательных в точках, между которыми вписан круг Роуланда;
- длина дуги OPB, занимаемая входами массива световодов, должна быть много меньше R ;
- при соблюдении вышеперечисленных условий длина пути между любым входом входного разветвителя и его любыми двумя последовательными выходными портами постоянна, а диапазон FSR примерно постоянен и не зависит от выбора пары вход-выход ($i-j$) мультиплексора.

Для сокращения размеров мультиплексора вдвое и экономии компонентов можно использовать схему Литтроу для компоновки мультиплексора, разрезав его исходную схему (см. рис. 8а) пополам и поместив в плоскости разреза зеркало (см. рис. 8в). Потoki несущих с выхода массива световодов будут отражаться зеркалом и подаваться со стороны внутренних выходных портов единственного разветвителя в тот же световод разветвителя, где будет происходить интерференция входных и отраженных волн. Входной порт должен размещаться при этом в центральном входном порту разветвителя.

Мультиплексор AWG может быть использован и в схемах с интерливингом [12]. В этом случае, применяя однородную интегральную основу, можно создавать мультиплексоры AWG с удвоенным числом каналов. Пример такого мультиплексора приведен в работе [13], число его обслуживаемых каналов – 102. Мультиплексор, построенный по схеме с использованием интерливера, разделяющего входные 102 канала (частотного плана с шагом 50 ГГц) на два канала (с четными и нечетными несущими), в каждом из которых используется мультиплексор AWG, рассчитан на обработку 51 канала частотного плана с шагом 100 ГГц.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОПТИЧЕСКОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ

Во всех указанных решениях процедура мультиплексирования предполагается обратной по отношению к рассмотренной процедуре демуплексирования. Параметры мультиплексоров WDM, реализованных на основе трех современных технологий, сведены в таблицу [9, 13–15].

Из приведенных в таблице данных видно, что технология 3DO (3-D Optics) WDM (на момент написания работы [9]) имела преимущество по четырем из пяти параметров и могла быть использована в системах WDM до уровня HDWDM с шагом несущих не меньше, чем 0,4 нм, и рассматриваться как перспективная. Однако новая генерация мультиплексоров AWG [13–15], используемая совместно с интерливерами на основе AWG [12], дает основание утверждать, как видно из строки "AWG (новая)", что наиболее перспективным и

Сравнение различных технологий оптического мультиплексирования

Технология	Максимальное число несущих	Шаг между несущими, нм	Вносимые потери, дБ	Переходное затухание, дБ	Чувствительность к поляризации, %	Температурный коэффициент, нм/°C
AWG (старая)	32–64	0,8–15	6–8	-5 – -29	2	0,01
AWG (новая)	102–400	0,2–0,8	2,2–6,4	-20–33	0,3	н/д
CG	78	1–4	10–16	-7 – -30	2–50	н/д
3DO	262	0,4–250	2–6	-30 – -55	0	н/д



с точки зрения возможности увеличения числа каналов, и возможности использования современных интегральных технологий, является мультиплексор AWG.

Кроме рассмотренного выше решения с использованием интерливера для удвоения числа обрабатываемых каналов, которое, вообще говоря, применимо к любому типу мультиплексора, в работе [14] приведен пример мультиплексора AWG на 256 каналов для частотной сетки с шагом 25 ГГц (который при использовании решения с интерливером может, в принципе, обрабатывать 512 каналов). Этот мультиплексор имеет эквивалентную ширину полосы канального фильтра 0,12 нм на уровне -3дБ с уровнем переходной помехи порядка -33 дБ и вносимыми потерями на уровне 4,4 дБ для центральных портов и 6,4 дБ для периферийных портов. Группа исследователей [15] сообщила также о разработке аналогичного мультиплексора, но на 400 каналов для частотной сетки с шагом 25 ГГц, покрывающего диапазон 1530–1610 нм. Он обеспечивает уровень вносимых потерь от 3,8 дБ (в центре) до 6,4 дБ (на периферии).

ЛИТЕРАТУРА

1. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / 2-е исп. изд. – М.: Радио и связь, 2003. – 468 с.
2. ITU-T G.671. Transmission characteristics of optical components and subsystems (6.02).
3. ITU-T G.692. Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers (10.98; Corr. 1, 2 – 1.00, 6.02).
4. ITU-T G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid (6.02).
5. Morra P., Vezzoni E. Fiber-Optic Splices, Connectors, and Couplers. – In: Fiber Handbook: For Engineers and Scientists / Ed. by F.C.Allard: McGraw-Hill Pub. Company. N.-Y., 1990, p.3.1–3.86.
6. Слепов Н.Н. Оптические мультиплексоры ввода-вывода. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, №1, с.40–43.
7. ITU-T G.694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM frequency grid (12.03).
8. Hoss R.J. Fiber Optic Communications Design Handbook: Prentice-Hall International Ed., 1990. – 435 p.
9. Laude J.-P., Liddane K., Slatter S. High-Density WDMs Provide More Bandwidth for Telecommunications. – In: The Photonics Design and Applications Handbook / 44th International Ed.: Laurin Publishing Co. Inc., 1998. – P. H-222–224.
10. Krauss O. DWDM and Optical Networks. Siemens: Publicis Corporate Publishing, 2002. – 196 p.
11. Ramaswami R. and Sivarajan K.N. Optical Networks: A practical perspective: Morgan Kaufmann Publishers, Inc. San Francisco, California, 1998. – 632 p.
12. Ding-wei Huang, Tsung-hsuan Chiu, Yinchich Lai. Arrayed waveguide grating DWDM interleaver. – OFC-2001, Anaheim, Paper WDD80-1.
13. Yoshinori Hibino. High contrast waveguide devices. – OFC-2001, Anaheim, Paper WB1-1.
14. Oguma M. Flat-top and low-loss WDM filter composed of lattice-form interleave filter and arrayed-waveguide gratings on one chip. – OFC-2001, Anaheim, Paper WB3-1.
15. 400-channel 25-GHz spacing arrayed-waveguide grating covering a full range of C- and L-bands / Y.Hida, Y.Hibino, T.Kitoh, Y.Inoue, M.Itoh, T.Shibata, A.Sugita, A.Himeno. – OFC-2001, Anaheim, Paper WB2-1.