

光通信中的新型光无源器件

梁中翥^{1,2}, 钟砚超^{1,2}, 孔庆峰^{1,2}, 梁静秋^{1,2}

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春, 130033;

2.应用光学国家重点实验室, 吉林 长春, 130033)

摘要: 基于全光网络的迅猛发展, 本文简单介绍了波分复用器、光开关、光插/分复用器件方面的新型光无源器件, 对器件原理、功能进行了阐述。文章对这些实现技术的特点进行了详细的分析和比较, 最后给出了结论和展望。

关键词: 全光网络; 波分复用器; 光开关; 光插/分复用器件; MOEMS

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

Theory and Experimentation Research on PI-cantilever

LIANG Zhong-zhu^{1,2}, ZHONG Yan-chao^{1,2}, KONG Qing-feng^{1,2}, LIANG Jing-qiu^{1,2}

(1.Chang chun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China; 2.State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130033, China)

Abstract: Based on the development of AON, the principle and functions of some new passive optical components such as WDM, optical switches and OADM were introduced in this paper. The characteristics of technology to realize these components were analyzed and compared. Finally, the summarization and prospect of these optical components were presented.

Keywords: AON; WDM; optical switch; OADM; MOEMS

1 引言

波分复用器、光开关、光插/分复用器是光通信中的主要器件。随着信息时代的来临,对通信的要求也迅速增长,传统的单根光纤传输单信号已经不能满足信息增大的需求,波分复用技术作为大容差的一种频分复用,具有易实现、成本低的优点,是目前提高光纤通信容量的最有效方法。随着光通信和密集波分复用技术的迅猛发展,日益复杂的网络拓扑结构对可靠、灵活的网络管理方式要求越来越高,光交叉互连(OXC)技术就是其中的一项关键技术,光开关则是OXC中的关键器件,尤其是无需光电、电光转换的全光交叉互连器件,其技术水平直接决定着光通讯网络的性能。因此,对各种光开关的研究被提到了极为重要的位置。光插分复用器(OADM)是波分复用器(WDM)全光通信网的核心器件,可以不经光/电/光转换和电处理,就能实现波分复用信道的分插功能,也就是说,OADM在光域实现了传统的电SDH分插复用器在时域内完成的功能,因而在光网络中有着极大的应用前景。

2 波分复用器

实现波分复用有多种形式,而且随着技术的发展不断有新的形式涌现。总的来讲,波分复用器件可以分为传统的和新出现的器件两类:由光滤波器组成的级联型波分复用器和同步输出的色散型波分复用器。前者适于波长数较少的情况,而后者可以实现多波长通道,实现密集的波分复用^[1]。

2.1 级联型波分复用器

2.1.1 介质薄膜型

介质膜滤光型波分复用器是目前工程中广为采用的波分复用器,它采用了介质膜滤光技术,即通过蒸镀多层膜来复用或解复用WDM系统中的特定波长。其原理如图1,其中的窄带滤光片是指透射一个波长而反射其他波长的滤光片,即带通波分复用器(BWDM)。被复用的光波在每个薄膜滤波器处发生

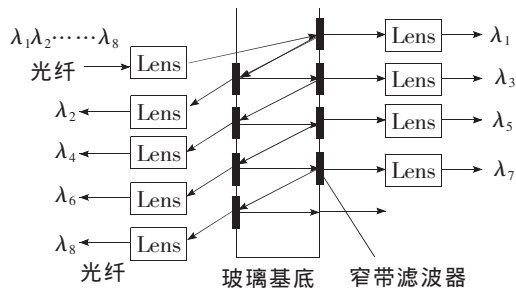


图1 介质膜滤光型波分复用器

干涉,某一特定波长的光信号的透射被相干加强,该波长被滤出;其余波长光的透射干涉相消而被反射,经多级滤波后将所有波长取出。

2.1.2 马赫-曾德干涉型

该种波分复用器的滤波单元是马赫-曾德干涉器(MZI),它是由两个3 dB耦合器级联而成,利用两耦合器间的两干涉臂长差使不同的波长在不同的输出臂输出。其实现形式可以是在两条相同的单模光纤上连续熔拉两个耦合器而成,也可以由基于二氧化硅光波导结构的平面集成形式实现。该波分复用器复用波长的间隔仅仅取决于两条干涉臂之间的长度差,即复用波长间隔可以做到很小,且具有分离/耦合效率高、附加损耗低及通道隔离度相对高等特点。但由于干涉仪特有的灵敏性,此类器件的温度稳定性略差,波长越密则稳定性越差。由马赫-曾德干涉器级联构成波分复用器的应用实例如图2所示,它的每一级都是将一束输入的多通道信号分离成互补的两束,一束包括奇数通道信号,另一束包括偶数通道信号,使得通道之间的间隔变为原来的两倍,然后多层级联形成波分复用器。

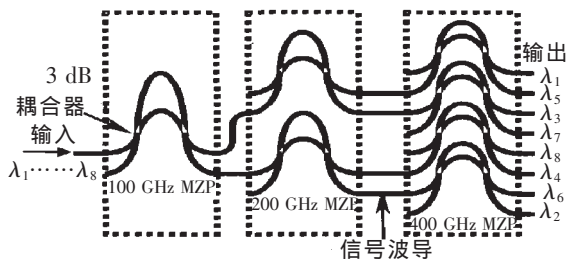


图2 马赫-曾德干涉型波分复用器

2.1.3 光纤光栅型波分复用器

这种用 UV 激光照射形成的 Bragg 光栅, 只对响应波长的光产生反射, 对其他波长的光透射, 串连或并联该光栅就可实现密集波分复用的复用器和解复用器。它的优点可以通过光纤光栅精密控制中心反射波长, 可任意选择带宽, 反射带宽可做得很小, 反射率达到接近 100%。容易进行温度补偿。由于光栅制作在光纤纤芯上, 故与普通光纤连接非常方便, 其原理图如图 3^[2]。

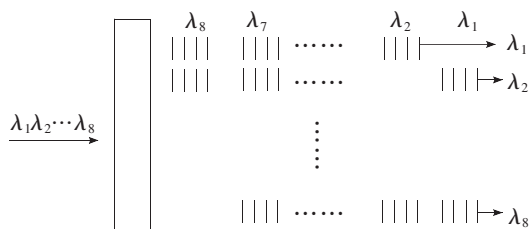


图 3 光纤光栅型波分复用器

2.2 同步输出的色散型波分复用器

2.2.1 体光栅色散型

体光栅型波分复用器源于传统的光谱分析仪技术, 组成形式多样。它具有偏振影响小、自由空间中传播损耗小、波长通道数很高的优点。其缺点是结构复杂、体积大、封装困难。一般采用反射光栅, 有少数用透射光栅、二元微光学器件等。通常用球面光栅同时色散和聚焦, 也有使用平面光栅色散, 用透镜聚焦。

2.2.2 集成平面色散型

集成平面色散型波分复用器基于平面波导结构, 因其具有插入损耗低、尺寸小、易与光纤耦合、工艺成熟、适于批量生产、重复性好的优点, 是波分复用器的热门课题。其中重要的两种形式是蚀刻衍射光栅 (EDG) 和阵列波导光栅 (AWG), 后者已成功商用, 是高通道市场中的主流产品。

蚀刻衍射光栅型波分复用器相当于将传统光栅型器件压缩到平面波导的二维空间里。这里的反射光栅由 RIE 或 ICP 等干法刻蚀得到, 因此又称为蚀刻衍射光栅 (EDG)。根据 Rowland 圆原理设计的凹面

光栅同时具有色散和聚焦能力, 在单个基片上实现波分复用, 如图 4。为了提高光栅的反射率, 通常在刻蚀成的光栅外表面镀上金属反射膜, 或者做成全内反射的 V 型槽面。

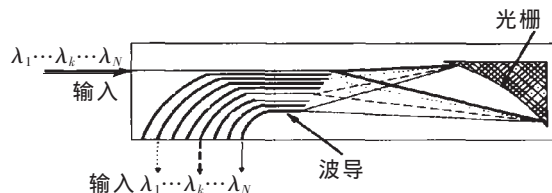


图 4 蚀刻衍射光栅型波分复用器

阵列波导光栅 (AWG) 型波分复用器主要由两个自由传播区和一个波导阵列组成, 波导阵列中的波导长度有规律地变化。实际上, 阵列波导区相当于将 EDG 的反射光栅转变成透射光栅, 通过改变波导的长度使这个透射光栅“闪耀”, 从而实现波分复用。图 5(a)是通常型的 AWG; 图 5(b) 是改进型 AWG, 它的输入输出波导和阵列波导都进行了优化设计; 图 5(c)中阵列波导终止于反射面, 输入输出共用一个自由传播区, 其尺寸大大减小, 但工艺相对困难。由于不需要像 EDG 一样刻蚀陡直的光栅面, AWG 工艺相对简单和成熟, 而且它的各方面性能都能够较好地满足现有波分复用系统的要求; 因此, 它在目前的波分复用系统中得到了广泛应用。

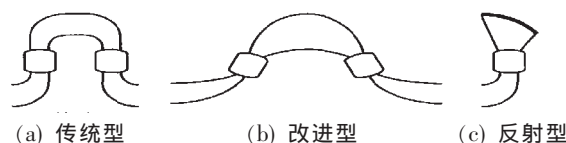


图 5 阵列波导光栅 (AWG) 型波分复用器

3 光开关

光开关可以实现光束在时间、空间、波长上的切换, 在光网络中有许多应用场合, 是光通信、光计算机、光信息处理等光信息系统的关键器件之一。

广义上来说, 光开关可以分为两个类型: 干涉仪型和非干涉仪型。干涉仪型依赖于光路之中的相位关系, 通过普克尔 (Pockels) 效应或热效应一般就可以达到相位控制。这类器件对环境非常敏感, 尤

其是对环境温度。它们对控制信号有循环响应, 这些控制信号通常需要对光输出进行监视, 亦即反馈, 以维持所要求的状态。方向耦合器就是典型的干涉仪型开关。非干涉仪型可用多种多样的方式制成, 它们对偏振、波长、温度和其他影响的敏感性低于干涉仪型器件, 要控制这些影响很困难。对于非干涉仪型开关, 开关功能的动态范围 (或开关比) 可以非常高。而干涉仪型开关中的动态范围, 则依赖于干涉束的光功率的精确平衡, 而且通常精度较低并较难保持。

3.1 非干涉仪型开关

3.1.1 微机械开关

光开关是宽带光纤通讯系统中的重要器件, 而基于微机电系统 (MEMS) 技术加工的二维阵列光开关更是一种很有前景的器件。这种二维阵列光开关在平面上布置有 $N \times N$ 个微镜, 每个微镜具有切入光路 (反射) 和离开光路两种位置状态。光开关与两组 N 根光纤相连, 分别作为入射端和出射端。当微镜 (i, j) 位于反射位置时, 由第 i 根光纤入射的光束经过微镜反射后由第 j 根光纤射出, 从而实现光路的选择^[3], 如图 6。三维阵列光开关如图 7^[4]。

尽管率先将 MEMS 光开关商用化的 OMM 公司在 2003 年 3 月因最后获得资金的希望破灭而暂时关闭, 2002 年 Onix 倒闭, IMMI 转向以及 2001 年 Xros 被 Nortel 收购, 目前仍有不少机构 (包括 Dicon、Luncent、Jdsu、Nortel 等) 在进行 MEMS 光开关的应用开发。2001 年 7 月, OMM 公司的二维 MEMS 光开关通过 Telcordia (GR-1073-Core) 可靠性测试, 工作

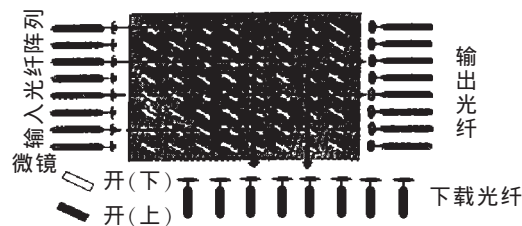


图 6 二维阵列光开关

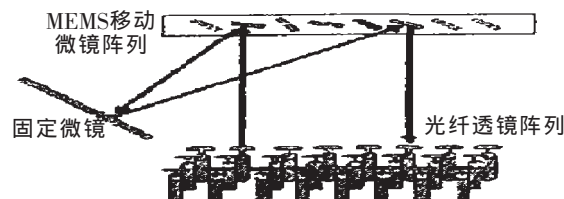


图 7 三维阵列光开关

3 800 万次无一失效, 消除了人们对 MEMS 技术可靠性的疑虑^[5]。

3.1.2 光机型开关

光机型开关通过光束路径的实际位移而路由光线。这些开关有赖于机械驱动, 诸如电子继电器、步进电机和压电元件等。光机型开关可提供性能卓越的光学参数, 诸如损耗、串扰、色散和其他的光谱与偏振相关性等。其他的技术竞争仅仅在尺寸、开关速度和可靠性等问题上。

3.1.3 液晶光开关

液晶光开关是利用液晶材料的电光效应。偏振光经过未加电压的液晶后, 其偏振态将发生 90° 改变; 而经过施加了一定电压的液晶时, 其偏振态将保持不变, 前后加两正交偏振片实现光路通断。其原理如图 8^[5]。

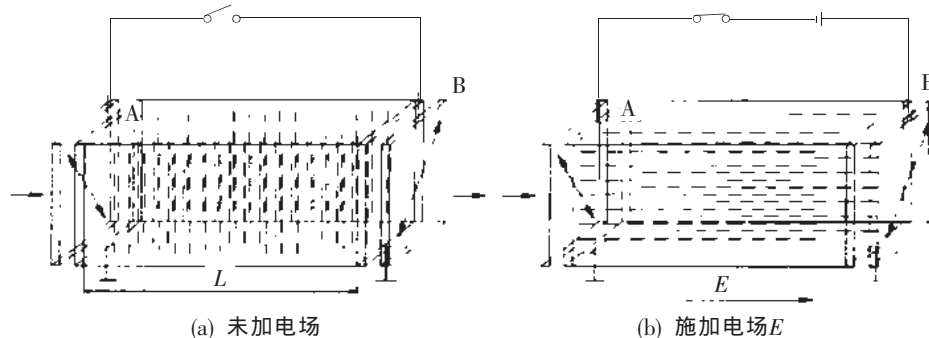


图 8 液晶光开关工作原理

现在已有技术使铁电液晶光开关的切换时间达到 1 ms 以下, 其典型插入损耗也优于 1 dB。预计液晶光开关在网络自愈保护应用中将有发展。CIR 公司的一份报告指出, 液晶光开关的市场在 2005 年可达 1.993 亿美元。理论上, 液晶光开关的规模可以做得非常大, 但在现实中似乎很难实现。Corning 公司和 ChorumTech 公司都宣布已做出 40×40 端口的液晶光开关^[6]。

3.2 干涉仪型光开关

3.2.1 普克尔效应开关

干涉仪型光开关主要指马赫-曾德干涉仪型 (MZI)。MZI 型光开关结构包括一个 MZI 和两个 3 dB 耦合器, 当加热器未加热时, 输入信号经过两个 3 dB 耦合器在交叉输出端口发生相干相长而输出, 在直通的输出端口发生相干相消, 从而通过控制加热器可实现开关的动作。为了实现更快的开关速度和更低的插入损耗, 最近又出现了利用半导体光放大器 (SOA) 的非线性作用制成的混合集成对称 MZI 全光开关, 结构如图 9^[7]。

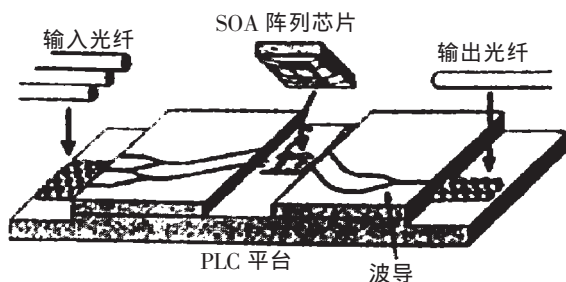


图 9 混合集成对称 MZI 全光开关

该类型开关的优点是非机械性、速度快、在微秒量级, 但缺点也非常明显, 它的消光比仅为 20 dB。

3.2.2 克尔效应开关

克尔效应, 亦即由光强度通过材料中的三阶光非线性度直接控制折射率, 逐一提供光信号的直接控制。它支撑着在目前还是研究课题的甚高速光逻辑器件的技术发展。现在能很容易产生的甚短 (fs)、甚强的多种光信号, 可直接在光纤或半导体波导中相互影响, 已经达到了数百 Gb/s 的光数字式运行。

由于强度牵制, 克尔效应开关在广泛使用的带宽与强度的路由光信号方面并没有作用。

4 光插分复用器

光插分复用器 (OADM) 是 WDM 全光通信中的核心设备之一, 它对其组网方式、传输方式、关键特性有重要影响。OADM 位于多节点光通信网络的中间节点处, 它的作用是从复用的单膜光纤中下载 (Drop) 本地所需的信号, 同时上载 (Add) 本地用户发往其他节点用户的信号进入复用单膜光纤中, 其原理图如图 10。

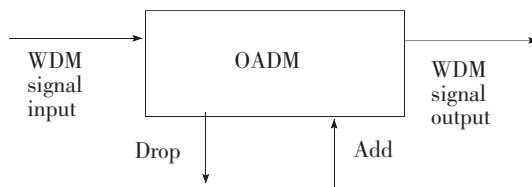


图 10 光插分复用器 (OADM) 工作原理

OADM 可分为两大类: 非重构型 OADM 和重构型。所谓非重构型 OADM, 主要是利用光波长复用器/解复用器和固定波长的光滤波器等无源光器件在节点处固定上下一个或一组波长。这类 OADM 器件的结构简单、性能稳定, 适用于波长固定不变、功能较少的简单的 WDM 网络中。重构型光插分复用器 (ROADM) 是光网络“智能”实现的重要基础。ROADM 不仅能够实现传统 OADM 的功能, 而且这些操作完全可以通过软件配置实现, 从而为分布式控制操作奠定基础。现主要介绍一下 ROADM。

目前, 从波长信道的上下路方式来看, ROADM 主要分为两大类: (1) 调谐型 ROADM, 上下路操作由可调谐滤波器实现, 输入滤波器的是多波长信号; (2) 开关型 ROADM, 上下路操作由光开关完成, 输入光开关的是单波长 (波段) 信号。

4.1 调谐型 ROADM

4.1.1 基于环形器的 ROADM

它采用两个三接口的环形器 (OC1, OC2) 与动态可调的 FBG 进行连接, 其中 OC1 的端口 1 为输入

信号、端口 3 为下路信号, OC2 的端口 2 为输出信号、端口 3 为上路信号。

其原理为: 光环行器 OC1 端口 1 的输入信号为多个波长的波分复用信号, 经过端口 2, 若需要下路信号, 则对 Bragg 光栅区域中的参数进行调整, 使 λ_n 被光栅反射回端口 2, 经过 OC1 的端口 3 作为下路信号, 其余信号都进入 OC2 的第 1 端口, 同时, λ_n 通过 OC2 的端口 3 插入到原有信号中。若不需要下路信号, 则对 Bragg 光栅进行调整, 使直通进入 OC2 的第一个端口: 这样可实现动态调整, 这种结构每次只能下一路或上一路信号或直通所有信号。如果一次要上下多路信号, 可以有两种方式: 一种是将多个可调 Bragg 光栅串连后与两个 OC 连接, 如图

12(a); 另一种方式是将多个图 11 结构进行串联, 如图 12(b) 所示。可直接得到某路信号而不需要解复用器, 但多配置了许多环形器, 平均两个环形器上/下路一路信号^[8-9]。这两种方式的缺点是: 第一种还要对下路信号解复用; 第二种由于引入了多个环形器而引入了较大的插入损耗。

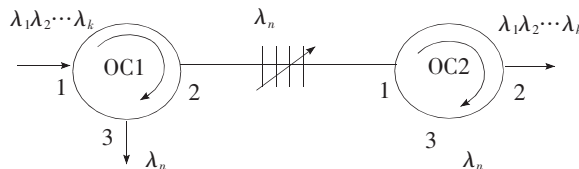


图11 基于环形器的ROADM

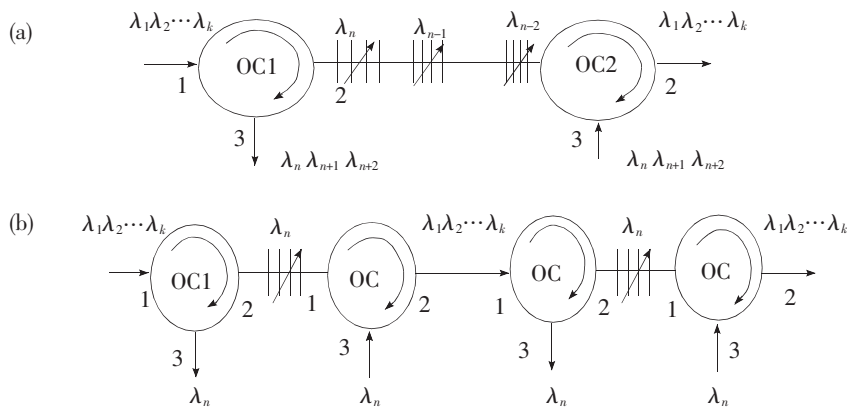


图12 串联ROADM

4.1.2 基于MZI的ROADM

MZI (马赫-曾德干涉仪) 是利用两干涉臂不同光程差实现光波长不同出口输出的器件, 各干涉臂可设有可调谐滤波器, 通过可调谐滤波器可以改变两个光束的光程, 即改变方向和相位, 两个光束到达右侧 3 dB 耦合器组合 (反射光束在左侧耦合器), 满足一

定的相位干涉条件使得波长信号 A 在下路端口输出而其它波长信号在输出端口离开。同理, 上路波长信号 λ_a 和剩余信号 $\sum \lambda_i - \lambda_d$ 组合在一起输出, 如图 13(a)。

为了实现多波长信道操作, 多个不同波长的 MZI 型 ROADM 单元被级联, 如图 13(b)。这种结构的优点在于实现简单、易于采用集成平面波导技术实

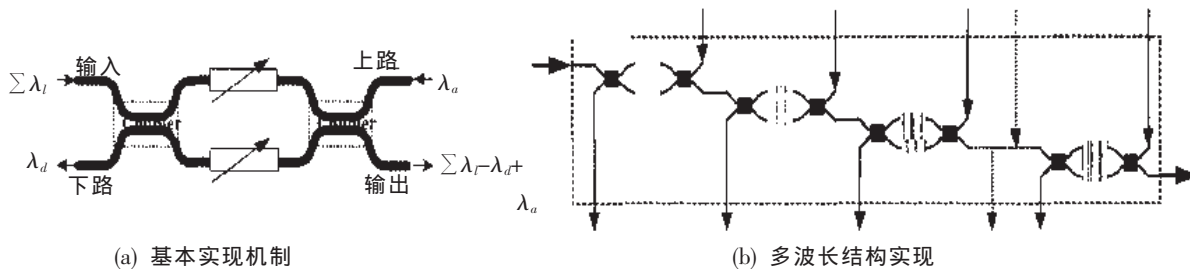


图13 基于MZI的ROADM

现、体积较小。但是，它要求满足极其严格的干涉条件：(1) 臂长差值为 0 ($\Delta L=0$)；(2) MZI 的功率分配、组合要达到绝对的 1:1，否则其性能会极差。实际上，这些条件常常很难满足，特别是对多波长输入信号，易产生串扰。

4.2 开关型 ROADM

其主要实现结构为分波器+光开关+合波器，如图 14 所示^[10]。其基本原理为：由分波器 (DMX) 将多波长信号分解成若干单波长信号，然后再由光开关 (2×2 、 1×2 或 $N\times N$) 根据网络配置要求对单波长信号执行上下路操作，最后上路和直通信号经合波器 (MUX) 组合成多波长信号输出。根据所采用光开关类型不同，ROADM 实现也有差异。图 14(a) 采用了 m 个 2×2 光开关来完成 m 个波长信道操作，通过控制 2×2 光开关的状态实现波长信道的直通 (Bar) 或上下路 (Cross)；图 14(b) 采用了 $2m$ 个 1×2 光开关来实现 m 个波长信道的操作，每 2 个光开关同步处理一个波长信道，其中 1 个控制波长信道下路，另 1 个控制对应波长信道上路；图 14 (c) 采用了 1 个 $N\times N$ 光开关来实现 m 个波长信道的操作，借助于 $N\times N$ 光开关矩阵的无阻塞交换，波长信道可以下路到任何端口。而为了实现 m 个信道操作，需要采用 $N=2m$ 的两端面或 $N=m$ 的四端面 $N\times N$ 光开关。无论是哪一种实现方式，光开关的插入损耗和响应时间最为关键，这取决于具体的实现技术。

图 14 中的 MUX/DMX 可以选用的类型很多，如 TFF 型、AWG 型等的波分复用器；在波长数较少的情况下 MUX 甚至可以用耦合器 (Coupler) 代替。光开关的类型也很多，如机械光开关、声光开关、电光开关以及最新发展的 MEMS 光开关等。其中，MEMS 光开关采用微机电制造技术，易于集成，且具有插入损耗小、响应速度快、信道串扰小，与波长和偏振无关，功耗低，性能优于其它类型光开关，目前可实现 1×2 、 2×2 、 $1\times N$ 、 $N\times N$ 等功能配置。提供该产品的主要厂家包括 JDSU、Oplink、Dieon、MEMSCAP、TransOptix 等。PLC 光开关借助于成熟的介质波导技术，可实现器件的高度集成，结构紧凑、可靠性高、速度快。如 NEL 公司的 8×8 无阻塞光开关矩阵采用 MZI 干涉仪和热光相移构件，消光比可 >40 dB，但插入损耗较大。虽然还有其它光开关技术，但目前唯有这两种的商用化程度较高。除了光开关外，构成 ROADM 的关键器件还有分波器和合波器。分波器决定了 ROADM 的串扰水平，一般采用隔离度较高的 WDM 解复用器来实现。对于端口数 (如 8 信道以下) 较少的应用，可采用介质薄膜 (TFF) 型 WDM 解复用器，否则多采用阵列波导光栅 (AWG) 器件。合波器既可采用 WDM 复用器来实现，也可采用耦合器；但耦合器插入损耗高且串扰大，不适于密集信道配置应用。

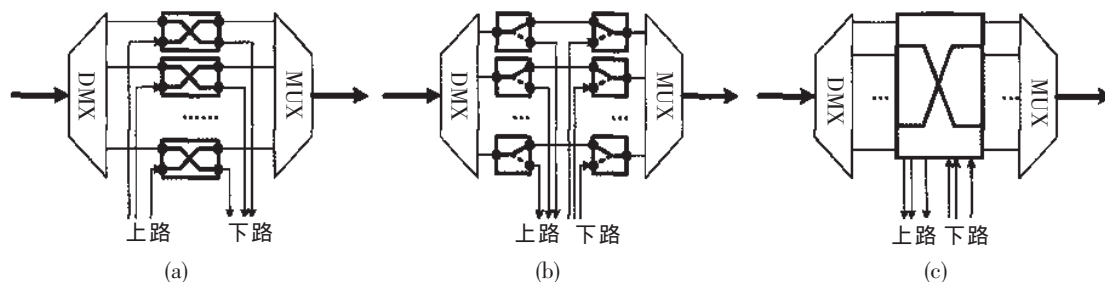


图 14 开关型 ROADM

5 总 结

总的来说，波分复用器、光开关、光插分复用器等光无源器件都朝着高性能、低成本、小尺寸方向

发展。具体来说，还有不同。波分复用器将朝信道数密集方向发展，集成平面波分复用的 AWG 和 EDG 将成为主流。CWDM 在城域网中也会起很大作用。光开关其发展趋势总体来说是向着高可靠、低损耗、

小功耗、小体积以及大规模方向发展。MOEMS 全开关具有体积小、集成度高、串扰小等特点,将在未来光通信网络领域中占据重要地位。OADM 器件则需要集上下路、性能监测、增益均衡、保护等多种功能于一体,同时升级扩展性好、性价比高的

ROADM 技术,基于 FBG 和 AWG 的 OADM 已成为 OADM 开发的主流。因此,这 3 种器件是相互促进、相互制约的,光通信往往是集各种器件于一身的有机的整体。

参考文献

- [1] 娄丽芳,盛钟延.光通信中波分复用器件的实现技术 [J].半导体光电, 2003, 24(1):13-18.
- [2] 黄章勇.光纤通信用新型光无源器件 [M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2003.
- [3] 刘文芹. MEMS 光开关研究 [J]. 传感器世界, 2005, 11(4):30-34.
- [4] 李苹,王俊华,万红.光开关技术研究[J].光通信技术, 2004, 28(4):15-17.
- [5] 李洪涛,何对燕.光开关的技术现状和展望[J].半导体技术, 2005, 30(2):6-9.
- [6] 刘琳.光开关技术发展及应用[J].光纤与电缆及其应用技术, 2002, (6):10-13.
- [7] 王刚,明安杰,梁静秋.光开关研究进展[J].微纳电子技术, 2005, 42(4):195-199.
- [8] 王建忠,刘永智.一种新型动态可调 OADM 的设计研究 [J].光通信技术, 2005, 29(2):61-62.
- [9] Otani T, Goto K, Kawazawa T, et al. Wavelength demultiplexer for sub-nm channel optical amplifier WDM system [C]. *IEEE/LEOS Summer Topical Meetings*, 1996, 57-58.
- [10] 黄照祥,张阳安,黄永清,等.可重构光分插复用器(ROADM)的技术实现与性能评估 [J].光通信技术, 2004, 28(12): 4-9.