

WDM 器件的技术途径

廖先炳

(重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘要:介绍了用于 WDM 系统中的 WDM 器件的工作原理、结构和制作方法,分析了器件的特性参数,展望了器件的应用前景。

关键词: WDM; 器件结构; 特性参数

1 引言

所谓波分复用(WDM)技术是指可在同一根光纤上成倍地提高传输容量的技术。早期的 WDM 主要是 1310/1550nm 两个波长的复用,由于掺铒光纤放大器(EDFA)的重大突破和随之的大量采用,使得 WDM 技术得到长足进展,并跃入密集波分复用(DWDM)。这是因为 EDFA 的带宽已从常规的 C 波段(1525~1560nm)扩展至 L 波段(1565~1615nm),因此人们可以在这个宽的放大带宽内尽可能地对波长复用,从而使光纤通信传输系统的容量从 2.5Gb/s 上升至 10Gb/s、20Gb/s、40Gb/s,甚至 100Gb/s(大约相当于一根光纤传输 310 万条话路)。WDM 技术不仅在光纤通信干线传输中得到广泛应用,而且在光纤接入网和光纤同轴电缆接混合接入网中得到广泛应用。为使 DWDM 标准化,ITU-T 建议将波长间隔定为 0.8nm(即 100GHz 的频率间隔)或 0.8nm 的整数倍。

WDM 器件是 WDM 系统的重要组成部分,按照 WDM 器件的不同应用和不同的制作方法,可将 WDM 器件分为熔融拉锥全光纤型 WDM 器件、干涉膜滤光型 WDM 器件、光纤光栅型 WDM 器件、阵列波导光栅型 WDM 器件和组合型 WDM 器件。下面将分别介绍各种 WDM 器件的基本工作原理、制作和应用。

2 熔融拉锥全光纤型 WDM 器件

熔融拉锥全光纤型 WDM 器件是广泛使用的一种 WDM 器件,主要应用是双波长的复用。如光纤通信系统用的 1310nm /1550nm WDM; EDFA 泵浦应用的 980nm /1550nm 和 1480nm /1550nm WDM; 光学监控系统应用的 1510nm /1550nm WDM(其中 1550nm 为信号光波长,1510nm 监控光波长)。表 1 列出常规熔融拉锥全光纤型 WDM 器件的特性参数。

表 1 常规熔融拉锥全光纤型 WDM 器件的特性参数。

参数	980/1550nm	1310/1550nm	1480/1550nm	1510/1550nm
带宽 (nm)	±10	±20	±5	±5
插入损耗 (dB,max)	0.3	0.3	0.5	0.5
隔离度 (dB)	>20	>20	>15	>15
温度稳定性 (%)	<3	<3	<3	<3
偏振相关损耗 (dB)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
方向性 (dB)			>60	
工作温度 (°C)			-40~+85	

这类器件的制作方法是将两根(或两根以上)除去涂覆层的裸光纤以一定的方法靠近,在高温加热下熔融,同时拉伸,最终在加热区形成双锥体形式的波导结构。

由于熔融拉锥原理所限制,单靠熔融拉锥方法是不可能制作出 DWDM 器件。即单个 2×2 融

耦合器无法制作出 DWDM 器件,这是因为在密集波分复用,波长间隔很小。要使两个输出端的波长间隔减小,在制作时必须增加耦合周期数。为此,需要相当长的拉伸长度,但这样不仅会增加器件的损耗,而且还会导致较大的偏振依赖性。所以,单个的 2×2 熔融型耦合器只能在较小的耦合周期数下制作成波长间隔较大的两波长复用器。然而,如采用两个 50/50 耦合比的熔融型耦合器串接,构成全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪 (MZI),利用其三个端口,可以实现 DWDM,图 1 示出其结构示意图。只要使两个串联的耦合器之间的两臂的光程差 $\Delta = n\lambda_1\lambda_2$ (n 为自然数 1, 2, 3),由于光程差是波长 λ_1 的整数倍,故 λ_1 在一个端口处为最大值,同时光程差又是 λ_2 的整数倍, λ_2 在另一个端口处也呈现出最大值,在这种结构的干涉仪中,波长之间的间隔可以小至 0.4nm (相当于 50GHz 频率间隔)。如果将这种单个的干涉仪组合起来,就可构成如图 2 所示的 DWDM 器件。对 N 个波长来说,需要有 $N-1$ 干涉仪排成树形结构。例如,一个用于 1.6nm 波长间隔的 16 个信道解复用器,其第一级的干涉仪将两个 8 波长解复用,它们之间的间隔为 3.2nm。第二级则有两个干涉仪,它们与第一级串联,将两个 4 波长进行解复用,使它们之间的间隔变为 6.4nm。第三级则有四个干涉仪,它们与第二级相串联,分路成 8 对。最后是第四级,拥有 8 个干涉仪,将 8 对再分离成 16 个独立的信道。这种 DWDM 器件的插入损耗很小,尽管整个复用器有 15 个干涉仪,且每个干涉仪又由两个耦合器组成,但每一独立波长只经过 4 个干涉仪。此外,由于所有信道都通过相同数量的元件,故采用这种构形的复用器的信道均匀性十分高。

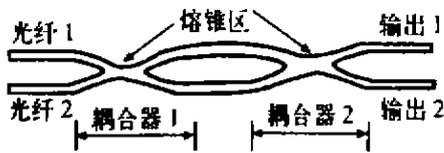


图1 全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪

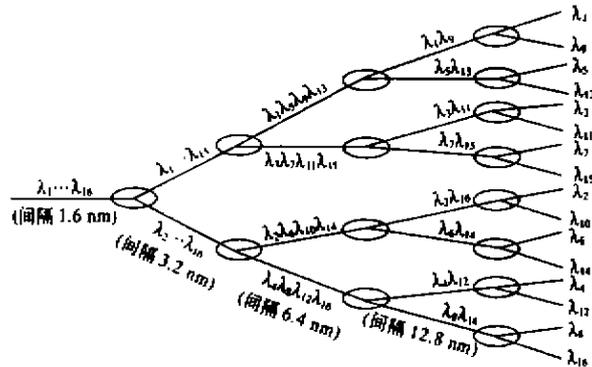


图2 利用 Mach-Zehnder 干涉仪组合的 DWDM 器件

3 干涉膜滤光型 WDM 器件

干涉膜滤光型 WDM 器件是实现 DWDM 最常用的器件,它是通过涂覆多层介质膜来复用或解复用 DWDM 系统中的特定波长。这类器件的优点是:信道数灵活,波长间的间隔可以不规则;可以加进多路复用/解复用单元使系统升级;插入损耗低;与偏振相关的损耗低;相邻波长之间的隔离度高 ($\geq 40\text{dB}$);完全无源,不需要温度控制。缺点是装配所需时间较长且整个器件的损耗和成本都与复用的信道数成正比。图 3 示出了多层介质膜干涉滤光器的原理图。目前,在工程系统中的复用器多为这类器件。为了达到所要求的波长响应特性,将高、低折射率不同的材料以预先设计的厚度淀积在玻璃基片上,从而产生不同类型的干涉效应,制作出各种窄带、宽带滤光器。因而,用干涉效应制作的这类器件又称为干涉膜滤光型复用器。制作的关键是设计不同折射率介质膜和严格的镀膜气氛以及精密可控的膜厚。适当的设计和工艺控制可以形成只透射一个波长而反射所有其他波长的滤光器,我们把这种功能的滤光器称为通带 WDM 滤光器 (BWDM)。若将多波长的 BWDM 以一定方式连接起来,便可构成所需信道数的 DWDM 器件,如图 4 所示。表 2 示出了这类器件的典型特性参数。

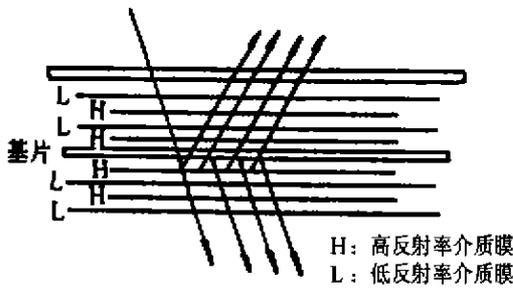


图3 多层介质膜干涉滤光器原理图

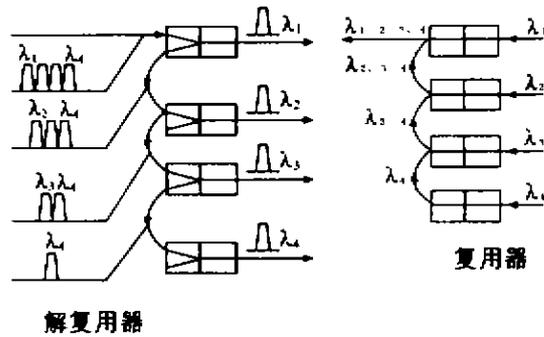


图4 利用介质膜滤光器串接构成的4信道DWD器件

表2 干涉膜滤光型DWD器件的典型特性参数

	4信道		特性参数
	ITU-TG.692	1549.32~1560.61	
中心波长 (nm)			
信道间隔 (GHz)	400 ±0.32 (±40GHz)	200 ±0.16 (±20GHz)	200 ±0.16 (±20GHz)
插入损耗 (dB)		≤0.3	≤0.7
信道隔离度 (dB)	≥23		≥23
信道内损耗起伏 (dB)	≤0.5		≤0.5
偏振相关损耗 (dB)	≤0.2		≤0.2
回波损耗(dB)	≥50		≥50
波长稳定性 (nm/°C)	<0.003		<0.003

4 光纤光栅型 WDM 器件

光纤光栅型 WDM 器件是利用紫外 (UV) 光诱导光纤纤芯的折射率呈周期性变化的机理形成的折射率光栅而制作的 WDM 器件, 当折射率的周期变化满足布喇格 (Bragg) 光栅的条件时, 该光栅相应波长的光就会产生全反射, 而其余波长的光顺利通过。这种反射型光栅相当于一种带阻滤波器, 亦称切趾滤波器或切趾 Bragg 光栅, 其滤波原理如图 5 所示。如果 N 个波长复用在 一根光纤上, 在光纤上串接 $N-1$ 个相应波长的反射型光栅, 则只有一个波长能顺利通过, 图 6 示出 8 波光栅型 DWDM 器件原理图。

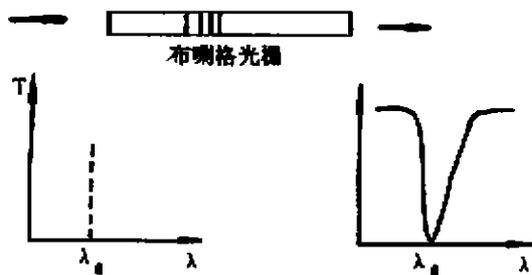


图5 光纤 Bragg 光栅的滤波作用

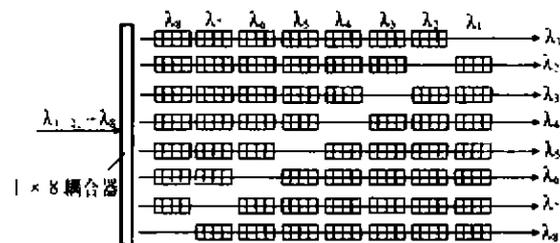


图6 8波光栅型 DWDM 器件原理图

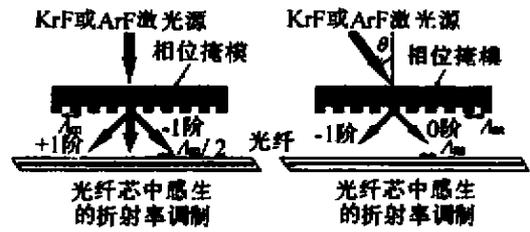
这类 WDM 器特别适全 DWDM 系统使用, 这是因为它具有如下的一系列优点:

- (1) 可以精密地控制中心反射波长;
- (2) 可以任意选择反射带宽;
- (3) 具有优异的滤波形状;
- (4) 由于光栅是制作在光纤芯上, 故与普通光纤连接十分方便。

光纤 Bragg 光栅是采用相位掩模方法制作。相位掩模本身是一种由熔融 SiO₂ 构成的光栅，将这种的掩模光栅放在 UV 光源光路线时能使中心阶的衍射最大，而使其他阶衍射和光能最小。首先，将带有光致抗蚀剂覆盖的石英板曝露到 UV 激光干涉的图案中，全息地制作出相位掩模。根据下面的关系式，选择掩模上期望的 Bragg 波长 (λ_b) 的光栅周期 (Λ_m)

$$\lambda_b = n_{eff} \Lambda_m \quad (1)$$

式中， n_{eff} 是波导芯的有效折射率。在光致抗蚀剂曝光后，通过使用反应离子腐蚀 (RIE) 将图案转印到熔融的 SiO₂ 衬底上，最后制作出相位掩模。图 7 示出使用相位掩模在光纤上制作 Bragg 光栅的示意图。利用这种方法已制作出用作制造滤光器的长周期光纤光栅。最近，又开发出一种依赖机械诱导而非光诱导的长周期光纤光栅的制作方法，使光滤波器的制作既简单又廉价。



(a)垂直照射相位掩模; (b)倾斜照射相位掩模

图 7 使用相位掩模在光纤上制作 Bragg 光栅

尽管光纤光栅型 WDM 器件具有美好的发展和应用前景，但也存在不足之处。例如，当在构成实际的 DWDM 时，需要使用价格昂贵的光环行器或 Mach-Zehnder 干涉仪，且随信道增加，复杂性和成本随之增加。此外，这类器件对温度较为敏感，需要进行温度控制。

5 平面型 WDM 器件

平面型 WDM 器件亦称阵列波导光栅 (AWG) 型 WDM 器件，其结构如图 8 所示。这类器件的优点是尺寸小，易于集成、性能稳定和制作成本低等。由于这类器件是平面光波回路 (PLC) 型的 WDM 器件，是最具前途的 DWDM 器件，当光时分复用技术采用这种器件时，可使一台接收机 (用户) 能享用 N 倍的信息流量。这类器件的核心部件是 AWG，AWG 可以是 SiO₂ 的 AWG，也可以是聚合材料的 AWG。但从目前制作技术看，在 Si 衬底上形成的 AWG 更为成熟，已报道制作出 128×128 AWG。如图 8 所示， $N \times N$ AWG 是由 N 个输入/输出波导、两个平板波导和相邻波导间具有固定路程差的阵列波导组成。为了消除复用的偏振依赖性，使用了半波板。其基本工作原理为：光信号经输入波导进入第一平板波导并在其内发生衍射，然后经激励进入阵列波导，由于阵列波导中相邻波导间有固定的路程差，故相邻波导间传播的光有一固定的相位差延迟，其相位差等于 $2\pi n_c (\Delta L / \lambda)$ ，其中 λ 是光波长， n_c 是波导芯的折射率， ΔL 是相邻波导产的路程差。不同波长的光信号在经过阵列波导后便根据不同的相位差把不同波长的光信号经第二平板波导后解复用输出到输出波导中。表 3 给出 16 信道 AWG 复用器的设计参数。

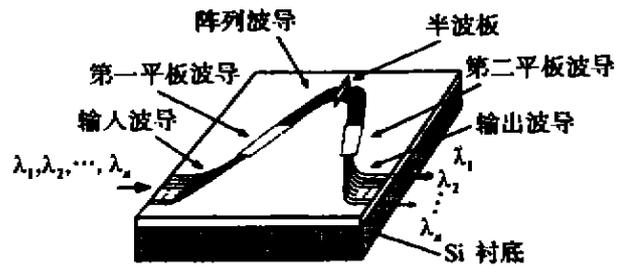


图 8 Si 衬底上形成的 AWG 芯片示意图

表 3 16 信道 AWG 复用器的设计参数

信道数 N	16
信道间隔	10GHz (0.08nm)
相邻波导间路程差 ΔL	1271 μ m
阵列波导数 M	64
凹平板的焦距	6001 μ m
衍射级	1190

为了减少耦合损耗,在平板波导边界上设计了扇出的阵列波导。

这类器件的制作十分的简单,首先使用火焰水解淀积(FHD)和反应离子腐蚀(RIE)的组合在Si衬底上形成纯SiO₂包层和Ge掺杂的SiO₂芯波导,芯和包层之间的折射率差等于百分之零点几(如0.75%)。为了调节相位差,可以使用热-光效应补偿方法,即在所有阵列波导的直线段制作薄膜加热器或a-Si膜。图9示出带有相位调节元件的AWG芯片的构形。

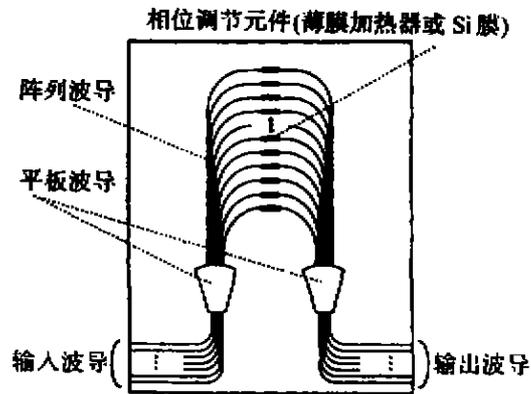


图9 具有相位调节功劳的AWG芯片

6 组合型 WDM 器件

为了获得更优性能和更高密集度的 WDM,可以采用几种构形的组合,这就是美国 E-Tek Dynamics 公司推出的组合型 WDM 器件。它采用熔融拉锥型耦合器、切趾 Bragg 光栅和 BWDM 的组合构形,其信道间隔可达 0.4nm。图10和图11分别示出利用组合构形的8信道复用/解复用器的工作原理图。

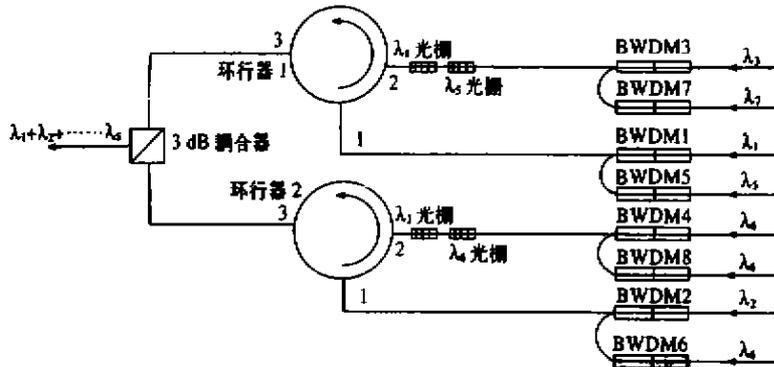


图10 组合型的8波长复用器的工作原理图

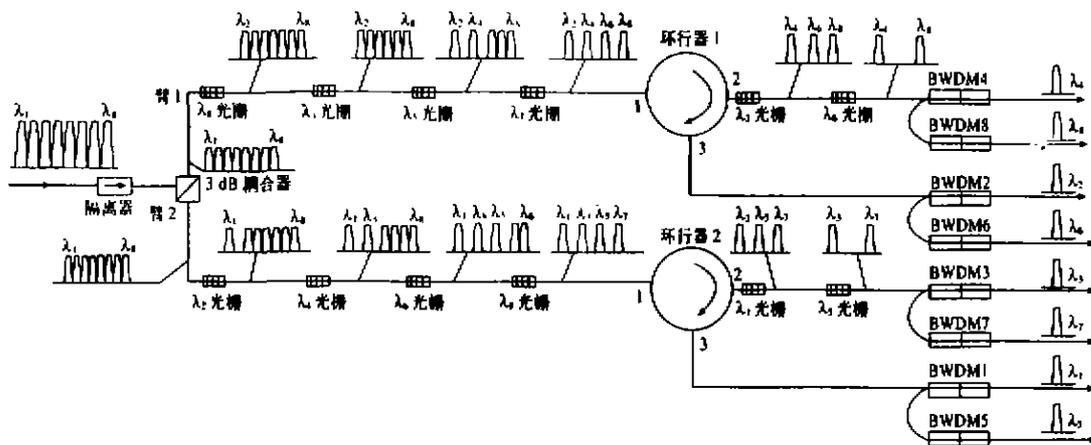


图11 组合型的8波长解复用器的工作原理图

在8信道的复用器中,首先将信道间隔为0.4nm的8波长光信号输入到对应的BWDM,λ₁和λ₅从环形器的端口1进入端口2,经切趾Bragg光栅反射到端口3;λ₃和λ₇则直接从环形器的端口2进入端口3。偶数波长(λ₂, λ₄, λ₆, λ₈)亦按同样原理方法进入另一个

环形器的端口3。最后经3dB耦合器复用到单根输出光纤。

变成0.8nm。对光纤耦合器的臂1来说,4个奇数波长(λ_1 、 λ_3 、 λ_5 、 λ_7)的光信号被4个切趾Bragg光栅阻止,而剩下的4个偶数波长(λ_2 、 λ_4 、 λ_6 、 λ_8)的光信号被传送到光环形器1;对光纤耦合器的臂2来说,4个偶数波长的光信号被4个切趾Bragg光栅阻止,而剩下的4个奇数波长的光信号被传送到光环形器2。

在解复用器中,信道间隔为0.4nm的8波长光信号通过光隔离器输入到熔融型的3dB光纤耦合器,并被分配到两个相等的输出臂中。每个输出臂上配置4个高反射率的切趾Bragg光栅。这样就相继地阻止4个波长的光信号,使通过的4个波长的光信号的信道间隔由0.4nm 4个偶数波长的光信号从环形器的端口1传输到端口2,其中 λ_2 和 λ_6 两个波长的光信号被2个切趾Bragg光栅从端口2反射到端口3。这时, λ_4 和 λ_8 的信道间隔为1.6nm。在切趾Bragg光栅之后再连接两个BWDM, BWDM4允许 λ_4 通过而将 λ_8 反射到BWDM8,于是 λ_4 和 λ_8 被解复用到输出光纤。在环形器的端口3, BWDM2和BWDM6以同样的原理将 λ_2 和 λ_6 解复用到输出光纤。4个奇数波长(λ_1 、 λ_3 、 λ_5 、 λ_7)的光信号亦以同样原理得到解复用。

7 结束语

介绍了五种不同类型的WDM器件,其各具特点。但对于系统应用来说,最为关心的是WDM器件的成本和能复用/解复用多少个波长的光信号。对熔融拉锥全光纤型WDM器件来说,由于熔融拉锥原理所限,通常只能用于波长间隔较大的两波长复用和解复用,这类器件应用最多的是低复用数的WDM系统和EDFA的泵浦光耦合。然而,如采用两个50/50耦合的熔融耦合器串接的全光纤Mach-Zehnder干涉仪构形的WDM器件,有可能应用于波长间隔为0.4nm的16信道的WDM系统。对于涉膜滤光型WDM器件和光纤光栅型WDM器件来说,是目前最有希望应用于DWDM系统的WDM器件,前者的典型波长数为2、4和8,后者的典型波长数为8、16,甚至为32。这两类WDM器件的优点是有较高的隔离度和较低的插入损耗,就目前实际系统而言,应用得最多的还是干涉膜滤光型WDM器,国内主要生产厂家生产的DWDM器件皆为该类型WDM器件。AWG型WDM器件是正在研究和开发的被认为是最有前途的DWDM器件。这类器件属于集成光学器件,不仅体积小,性能优异和成本低廉(指成本与波长数关系),而且可以实现几十个,甚至100多个波长的复用和解复用。在AWG型WDM器件未得到大规模应用和系统有特殊要求时,可以采用成熟的工艺的组合型WDM器件。

就目前情况看,WDM器件的研究、开发水平明显低于系统应用的要求。随着WDM系统的迅猛发展,需要更高质量和更高密集度的WDM器件。