

DWDM 系统中的 Interleaver 技术

裴 丽, 董小伟, 李 彬, 简水生

(北方交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

[摘 要] 目前密集波分复用(DWDM)系统已广泛应用于长途干线、城域网,并扩展至接入网。其中波分复用/解复用器是系统的核心器件之一,而 50 GHz 的密集波分复用更要靠一种交叉波分复用(Interleaver)的全新器件,为此详细阐述了 Interleaver 的原理、主要实现方案及其特点。

[关键词] 密集波分复用;交叉波分复用;光纤通信

[中图分类号] TN929.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-1908(2004)01-0011-03

Interleaver technology in DWDM system

PEI Li, DONG Xiao-wei, LI Bin, JIAN Shui-sheng

(Lightwave Technology Institute, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: At present, dense wavelength division multiplexing(DWDM) systems have been widely used in the long haul link, metropolitan area network(MAN), and access network and so on. And MUX/DMUX is one of the key devices. Especially in the 50GHz DWDM system, interleaver must be used. Consequently, the theory and implement schemes of it are introduced.

Key words: DWDM system; interleaver; fiber optic communication

1 Interleaver 在 DWDM 中的应用

在密集波分复用(DWDM)系统中,有两种技术方案可提高光纤带宽的利用率:1)减小信道间隔,增加信道数目;2)增加单信道容量。对于前一种方案,人们需要研制超窄带滤波器。采用镀膜工艺生产的介质薄膜滤波器件是性能良好的窄带滤波器,具有透射谱顶部较平、相邻信道和非相邻信道隔离度高、插入损耗较小以及温度稳定性好等特性。但是镀膜工艺很难将介质薄膜型器件的信道间隔做到 50GHz 以下,因为信道间隔压窄一半,就要多镀上百层薄膜,镀膜误差增加,成品率下降,产品价格上升。交叉波分复用(Interleaver)技术最初就是针对这一问题而出现的,如图 1 所示,它回避了传统镀膜工艺的局限,以奇偶信道交叉复用方式压缩了信道间隔,从而提高通信的容量。将薄膜滤波片与一个 Interleaver 组合,不仅解决了通道间隔小于 50GHz

的滤光片产量低的问题,而且解决了由于级联结构所导致的插入损耗增加的问题^[1]。

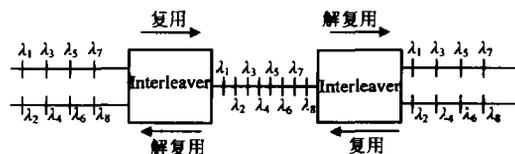


图 1 Interleaver 在 DWDM 系统中的应用

2 Interleaver 的基本工作原理^[1]

Interleaver 的基本工作原理是两束光的干涉,干涉产生了周期性的、原来信号波长整数倍的输出,通过控制干涉的边缘图案就可以选择合适的频率组输出。换句话说,通过合适的干涉参数设计,可以使 Interleaver 的透射谱呈梳状波的形状。Interleaver 可将一束多信道信号分离成互补的两束,一束包括奇数信道信号,另一束是偶数信道信号,使得信道之间的间隔变为原来的两倍,利用级联的 Interleaver 可实现更宽的通道分离。

3 Interleaver 的制作方案

目前,Interleaver 的制作方案有:晶体双折射型;全光纤熔融拉锥非平衡 MZI(马赫-曾德尔干涉

[收稿日期] 2003-07-14

[基金项目] 国家“863”计划项目(2001AA312090);国家自然科学基金资助项目(60077008)

[作者简介] 裴 丽(1970-),女,北方交通大学光波技术研究所通信与信息系统工程专业博士。

[作者地址] 北京市西直门外上园村,北方交通大学光波技术研究所,100044

仪)型;MGTI 型,即 MI(迈克尔逊干涉仪)+G-T (Gires-Tournois)干涉仪;阵列波导光栅(AWG)型;光纤 Bragg 光栅(FBG)组合型;液晶型;F-P(法布里-珀罗)腔型等。下面介绍其中主要的几种方案。

3.1 晶体双折射型^[3]

晶体双折射型的 Interleaver 结构如图 2 所示,它利用的是晶体的双折射效应+偏振光干涉,最终目的是实现双光束干涉。

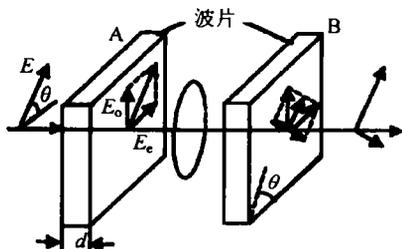


图 2 晶体双折射型 Interleaver 结构示意图

波片 A 和 B 的光轴方向夹角为 θ ,输入线偏振光的振幅为 E (偏振方向平行于 B 波片的光轴),进入波片 A 后由于双折射效应,光被分解为 o 光和 e 光,振幅分别为 E_o 、 E_e ,位相差为 $\Delta\phi$,进入波片 B 后由于双折射效应,光再次被分解为 o 光和 e 光,振幅分别为 E_{oo} 、 E_{oe} 、 E_{eo} 、 E_{ee} ,如图 3 所示。由偏振光干涉可知, E_{oo} 和 E_{oe} 、 E_{eo} 和 E_{ee} 分别发生双光束干涉,且波片 B 对 E_{oo} 和 E_{oe} 引入了 π 的相移。奇数波长与偶数波长由于偏振态正交而分为两组,其后再加一个偏振分束器,将奇、偶信道的光在空间上分离出来,再分别级联具有相应信道间隔的普通滤波器,即可实现普通信道的复用与解复用。其优点是可以灵活设计满足不同信道间隔要求的器件,稳定性好,可靠性高。但因与偏振相关,需加入偏振分束器将奇、偶信道的光在空间分离出来,因此插入损耗较大;对晶体本身加工精度要求较高;对折射率测量要求很高,且存在温度漂移问题。

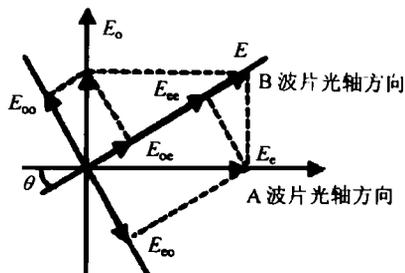


图 3 晶体双折射型 Interleaver 原理示意图

3.2 MGTI 型^[2]

如图 4 所示,MGTI 型 Interleaver 是在迈克尔逊干涉仪的一个干涉臂上增加了 G-T 干涉仪,G-T

干涉仪是前、后反射镜的反射率分别为 R 和 100% 的 F-P 腔,没有波长选择性,相当于全通滤波器,但是对不同波长的光信号能够产生不同的相移,起到相位调制的作用。通过适当的光路设计使得两个输出端口对应的均是双光束干涉输出,两者的光强相同,但是相位差不同。从而使奇、偶信道的信号分别从不同的输出端口输出,实现奇、偶信道信号的分离。

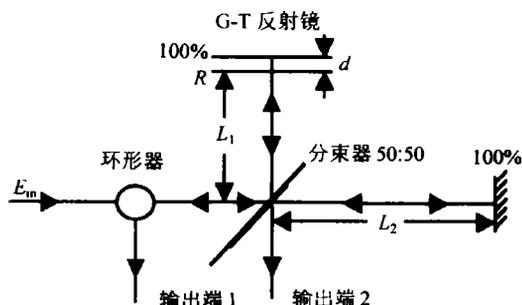


图 4 MGTI 型 Interleaver 结构示意图

MGTI 型 Interleaver 的优点是与偏振无关,可以设计成全光纤器件。由于 G-T 干涉仪的相位调制作用对于产生平顶的频谱响应特性十分有效,放宽了对信道中心波长抖动和漂移的限制。并且通过改变 G-T 干涉仪前、后反射镜间距 d 和迈克尔逊干涉仪两干涉臂长度差 $(L_1 - L_2)$,可以实现信道间隔和中心波长的调整。缺点是需要使用环形器,价格昂贵,且对周围环境的稳定性有较高要求。

3.3 全光纤熔融拉锥非平衡 MZI 型^[4]

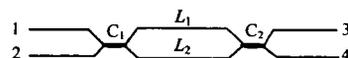


图 5 全光纤熔融拉锥非平衡 MZI 型 Interleaver 结构示意图

如图 5 所示,在两根相同的单模光纤上连续熔融拉锥,形成分束比为 $1:1$ 的两个光纤耦合器 C_1 和 C_2 ,两个干涉臂的光程差为 $|L_1 - L_2| = \Delta L$ 。则干涉仪输出端口 3、4 的光场强度分别为:

$$\begin{cases} I_3 = I_0 \sin^2(\beta\Delta L/2) \\ I_4 = I_0 \cos^2(\beta\Delta L/2) \end{cases} \quad (1)$$

式中 I_0 为输入光场的强度, β 为传输常数。因此,通过控制两个干涉臂的光程差可以改变震荡周期,从而可在输出端口 3、4 分别得到奇、偶信道的光信号。图 6 为利用 MZI 构成 Interleaver 解复用的示意图。

全光纤熔融拉锥非平衡 MZI 型的 Interleaver 与偏振无关,是一种全光纤型无源器件,与光纤的耦合效率较高,制作工艺简单,体积小,成本低,插入损耗小,信道均匀性较好。理论上可以做到信道间隔很小。但存在温度漂移,且对两臂的光程差要求较高。

第一个耦合器分束比可以精确地控制在 1 : 1,其误差对 MZI 耦合干涉造成的影响可以忽略。在第二个耦合器控制过程中由于已经有 M-Z 干涉效应产生,不能用普通办法监测,其分束比较难控制。

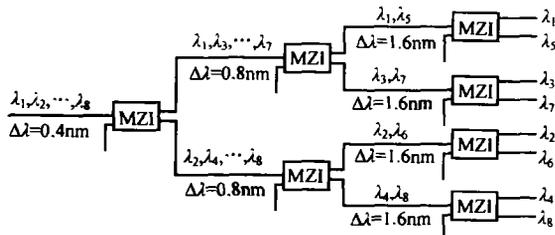


图 6 利用 MZI 构成 Interleaver 解复用示意图

3.4 AWG 型^[5]

如图 7 所示,AWG 型 Interleaver 由输入自由传播区、阵列波导区和输出自由传播区组成,阵列波导区中每个波导之间有固定光程差,使得不同波长的光信号在输出自由传播区干涉,并从不同输出波导口输出。

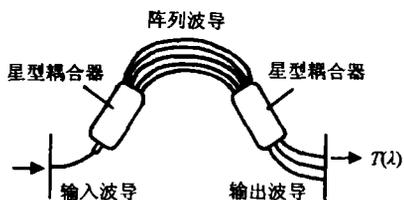


图 7 AWG 型 Interleaver 结构示意图

AWG 型 Interleaver 需要精密控制材料厚度、成分及其缺陷。AWG 属于集成光学范围,容易以小体积实现大规模信道复用/解复用,AWG 本身还具有信道间隔较窄(能做到小于 50 GHz),信道损耗均衡,信道串扰较小和通频带顶部较平等特点。但这种 Interleaver 的插入损耗和偏振损耗较大,温度稳定性不好。

3.5 FBG 组合型

如图 8 所示,这是美国 E-Tek Dynamics 公司推出的 8 信道波分复用/解用器,其中级联的 FBG 和光环行器就是用于实现交叉复用的^[6]。首先,熔锥型 3 dB 光纤耦合器将信道间隔为 0.4 nm 的 8 个信道平均分配到两输出端。每个输出端上配置 4 个波长间隔 0.8 nm 的高反射窄带 FBG 滤波器,滤去相应的 4 个波长,使另外的 4 个波长通过,实现第一级交叉信道分波。对光纤耦合器的臂 1 来说,4 个奇信道的光被反射,而剩下的 4 个偶信道的光被传送到光环行器 1;对光纤耦合器的臂 2 来说,4 个偶信道的光被反射,而剩下的 4 个奇信道的光被传送到光

环形器 2。每路通过的 4 个信道(信道间隔为 0.8 nm),经过由光纤光栅和环形器组成的第二级交叉信道分波系统后,分成信道间隔 1.6 nm 的 4 路光信号。之后分别经过介质薄膜滤波器将这 4 路信号最终解复用为信道间隔为 3.2 nm 的 8 路光信号。用 FBG 和环形器取代介质薄膜滤波器,虽然插入损耗不会降低,但是分波后的信道功率均衡性较好。反之,则构成 FBG 型复用器。

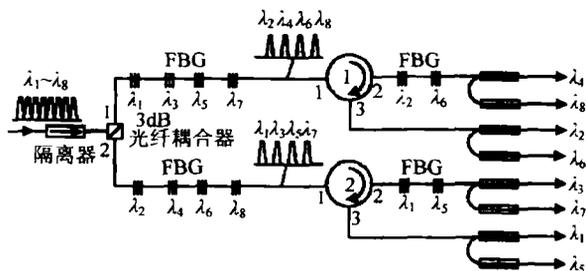


图 8 FBG 型 8 信道波分解复用

FBG 是一种窄带滤波器,它的带宽可以做到 50 GHz,甚至小于 50 GHz。对常规 FBG 进行空间取样制备成取样光栅,能够实现梳状滤波功能。这种器件的信道间隔可以做得很窄,一根几厘米长光纤取样光栅就可以实现多个信道的交叉复用。将取样光栅与光环行器配合使用,可构成高性能的 Interleaver 器件^[7]。

FBG 组合型 Interleaver 需要使用环形器,因此价格较昂贵。随着信道数的增加,复杂性与成本随之增加,级联多个 FBG 将会使器件体积庞大。

以上几种 Interleaver 器件相比较而言,全光纤熔融拉锥非平衡 MZI 型 Interleaver 和 MGTI 型 Interleaver 带宽最窄,实现 25 GHz 甚至更小的带宽毫无问题,现已有商品问世。由于 FBG 制作技术的日趋成熟,制备出带宽小于 25GHz 的 Interleaver 器件也已经不成问题,限制其大规模使用的主要原因是光栅的长期温度稳定性较差。AWG 型与晶体双折射型 Interleaver,要实现 50GHz 以下窄带应用,对工艺加工的要求非常高,难度较大。

4 结 论

Interleaver 的出现使许多传统滤波器技术在 DWDM 应用中重新找到了自己的位置,大大降低了器件设计制作的压力,有效提高了滤波组件的性能价格比。理想的 Interleaver 器件应当满足插入损耗低、通带形状平坦、信道间串扰小、温度和机械稳

(下转第 27 页)

60b 所需时间;4)对上层协议透明,支持 Cisco ISL 链路;5)按 Bit-Forward(位转发)模式线速转发,最大转发速率 148 800 包/s。

2.3 $10\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}/100\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 自适应媒体转换器

与 100 Mb/s 媒体转换器相比, $10\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}/100\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 自适应媒体转换器不仅要完成光电信号的转换,而且要实现不同速率间的速率匹配。因此必须采用存储转发模式。具体设计中我们将一个以双绞线为介质的 PHY 芯片和一个以光纤为介质的 PHY 芯片分别通过 MII 接口于 MAC 层交换芯片相连,利用缓存技术实现速率匹配。工作模型如图 4 所示。

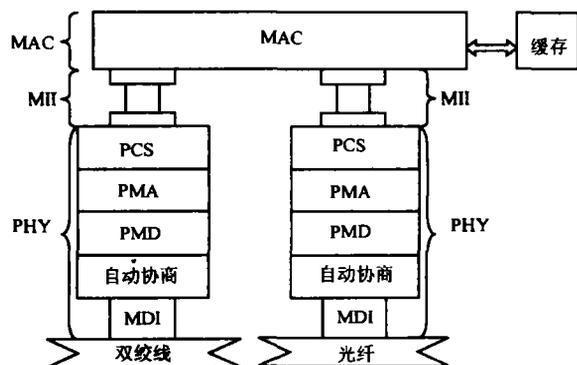


图4 $10\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}/100\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 自适应媒体转换器工作模型

我们的设计方案中的核心芯片是采用 Kendin 公司的 KS 8993。该芯片带有物理层的三端口交换芯片,并且片内集成有 32kb 缓存,易于调试。其中两个 PHY 以双绞线为传输介质,另一个 PHY 以光纤作为传输介质。功能框图如图 5 所示。

$10\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}/100\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 自适应媒体转换器主要具有以下特性:1)符合 IEEE 802.3 以太网标准和 IEEE 802.3u 快速以太网标准;2)符合 IEEE

802.1Q 标准,支持 VLAN 协议;3)支持 $10\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}/100\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 和全双工/半双工自适应功能;4)支持 IEEE 802.3X 全双工和 Back-Pressure(后压)半双工流量控制功能;5)采用 Store-and-Forward(存储转发)模式进行线速过滤和转发,最大速率 148 800 包/s;6)MAC 地址自学习、自更新功能。

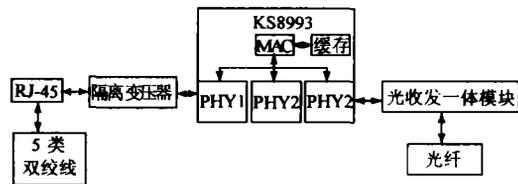


图5 $10\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}/100\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 自适应媒体转换器的功能框图

3 结束语

100 Mb/s 和 $10\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}/100\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 两种自适应媒体转换器完全符合 10Base-T、100Base-TX、100Base-FX 和 IEEE 802.3u 标准,与其他厂家的网卡、中继器、集线器和交换机等完全兼容,在以太网宽带接入中均得到了广泛的应用,但由于 100 Mb/s 媒体转换器在性能上(如超低延时特性)更优于 $10\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}/100\text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 自适应媒体转换器,因此在市场上更受欢迎。

[参 考 文 献]

- [1] JAYANT K, LAN C, MOHAN K. 千兆位以太网教程[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [2] 谢希仁. 计算机网络[M]. 大连:大连理工大学出版社,1996.
- [3] 助力宽带接入——光纤收发器购买指南[EB/OL]. <http://www.fiberhomenetworks.com.cn/cpjs-ys9.htm>,2002-12-12.

(上接第 13 页)

定性好等要求。因此必须深入研究,进一步解决 Interleaver 器件中材料性能、工艺水平、稳定性和可靠性等关键问题。

[参 考 文 献]

- [1] 方祖捷. 用于 DWDM 系统的双折射型 Interleaver 原理分析[J]. 中国激光,2001,28(11):1018-1020.
- [2] 张瑞峰. 奇偶交错空分滤波器[J]. 光电子·激光,2002,13(6):652-656.
- [3] 李会士,黄河振. 基于双折射晶体的光交叉波分复用

器[J]. 光学技术,2001,27(5):455-457.

- [4] 柯昌剑. 晶体型 Interleaver 器件的带宽优化设计[J]. 激光与光电子学进展,2001,38(9):1-6.
- [5] HUANG D W, CHIU T H, et al. Arrayed waveguide grating DWDM interleaver[A]. OFC'2000[C]. 2000. WDD:80-1-80-3.
- [6] 蔡燕民. 波分复用系统中的交错复用器(Interleaver)技术[J]. 激光与光电子学进展,2002,39(1):1-6.
- [7] LI L, FANG Z J, et al. Sampled FBG based optical interleaver[J]. Lasers and Electro-Optics, 2001, 1:I-404-I-405.