

光纤光栅及其在光波分复用技术中的应用

李维民, 黄海清, 王元一

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:分析了光子诱导所致的光纤光栅形成机理,如紫外激光干涉条纹图下的横向侧面曝光法,介绍了光纤光栅在光波分复用技术中的应用。

关键词:光纤布喇格光栅;波分复用;解复用

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2000)03-0080-03

由于超高速、大容量、长距离光纤通信的要求,人们采用了光波复用通信的方式。目的在于挖掘光纤传输的潜能,因为目前已获得的最高传输容量只相当于利用了光纤潜在传输能力的0.24%。光波复用技术分为波分复用(WDM)或频分复用(FDM)技术和时分复用(TDM)技术两种,由于TDM技术受到电子器件的电子瓶颈问题等困难,使其很难再提高其工作速率,目前国际光纤通信系统采用将两种方法结合使用的办法,即先用TDM的方法提高速率,再用WDM方法实现高速率传输。

在WDM系统中,同一根光纤中要同时实现传输具有不同波长的信道。最早的WDM采用光纤的两个低损耗窗口,即 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 两个波长的信道进行复用,现在研究工作进入在一个波长附近处间隔为0.8nm的整数倍的密集波分复用(DWDM)系统^[1],DWDM系统的实验记录是132路的复用系统,每路光载波传输20Gb/s,一根光纤中同时传输容量达2.64Tb/s,1999年国际会议论文集登出DWDM系统在一根光纤上同时传输数字速率达3Tb/s的最高实验记录^[2],在今后的5年中,这一数字还会再提高。被复用的每一信道可以以不同的形式调制,同时传输不同的信息业务,适应不同的要求。复用解复用器是WDM技术的关键,本文将从WDM系统中所用到的一种光栅型波分复用/解复用器的基本原理来说明这一技术的特性和重要应用。

1 光波分复用与解复用

在WDM系统中,波分复用器用于发射端,将多个波长的信号复合在一起并注入传输光纤中,而解复用器则用于在接受端将多路复用的光信号按波长分开,分别送到不同的接收器,最简单的波分复用器是基于元件的角度色散特性,如:棱镜和衍射光栅,另外还有光滤波器和定向耦合器等。从原理上讲,一个波分解复用器反过来用即为波分复用器,但在WDM系统中,对它们的要求不完全一样,解复用器严格要求波长的选择性,而复用器却不必。

图1给出了一个反射光栅型波分解复用器的原理图,多波长的信号入射到一个反射光栅上,光栅对不同波长的光衍射角度不同,利用一个透镜将不同的信号聚焦到不同的光纤内,从而实现解复用功能。

光栅可以是反射型的也可以是透射型的,如图2所示。如果能将这种性能的光学元件直接做进光纤,的确是一种大胆的设计,但是随着1989年第一只用全息干涉的方法在掺锗石英光纤的芯层中写入了谐

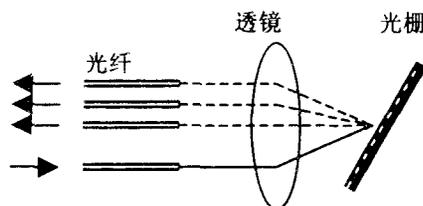


图1 反射光栅型波分解复用器

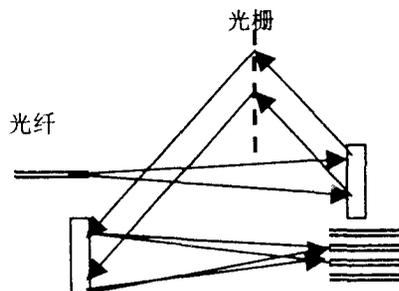


图2 透射光栅型解复用器

振波长位于通信波段的光纤布喇格光栅(FBG)的实现,这一领域已成为一个新的技术研究热点。

2 光纤光栅

在波动光学中,实现光的干涉可以有两种方法,分波阵面法和分振幅法,光栅是用分波阵面法来实现多光束干涉的一种方法。这种方法可以是在不透明的屏上刻出很多平行、等宽而又等间距的狭缝,从而起到了以周期性传递函数来调制入射平面波的波阵面达到对干涉强度分布的调制。如果是宽带光入射,光栅对不同波长的光衍射角不同,利用这一特性实现解复用。而分振幅法改变的是反射光或透射光的相位,如多层光学介质膜,通过周期性的改变一定厚度处介质膜的折射率,可以控制某一波长的光全部被反射或全部透射,从对波长能够进行选择这个意义上来说,这种光学介质膜实际上就是一个相位光栅。图 3 是一种介质薄膜干涉滤波型 WDM 器件的原理图,干涉滤波器由多层不同材料、不同折射率和不同厚度的介质膜按设计要求组合而成,经高折射率层的反射光同相叠加,形成很强的反射光。在偏离高反射波长两侧,反射光陡然降低,大部分光成为透射光。从而对某一波长范围呈带通,而对其他波长范围呈带阻。

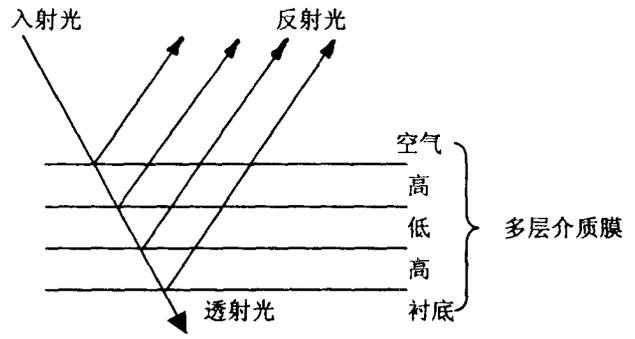


图 3 介质薄膜干涉滤波器型 WDM 器件的原理图

如果光纤沿长度方向做成折射率周期变化的膜层,那么就在光纤中建立了一个相位光栅。自从 Meltaz 首次采用相干紫外光侧面写入 FBG^[3]以来,目前已有多种方法可以在光纤中形成这样的相位光栅^[4]。制做光纤光栅主要是利用光纤的光敏性质,当强激光通过掺杂光纤时,光纤的折射率随光强的空间分布发生相应的变化,变化的大小与写入光强的平方成正比关系,全息紫外激光束写入的方法,是通过控制入射激光束的入射角来控制光栅折射率的周期性变化。一般的光纤光栅都有严格的周期性,不具有此性质的光栅如:啁啾型光栅等,目的是可以在周期性光栅阻带中打开透射窗口,提高光栅对某一波长光波的选择性,或是用来消除色散等。

3 光纤 Bragg 光栅的形成

对均匀光栅折射率可表示为

$$n(z) = n_0 + \delta n [1 + \cos(\frac{2\pi z}{\Lambda})] \tag{1}$$

式(1)中, n_0 为未曝光时纤芯的折射率, δn 是光致折射率变化的幅度, Λ 为光纤光栅的周期, Λ 由形成光纤光栅的两束相干光的波长和夹角决定。由于均匀变化光纤中传输光波的波动方程和 Maxwell 方程等价,如果波动方程对光波的每个横向分量都成立,那么矢量的每个横向分量也都满足如下的标量波动方程:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + [n^2 k_0^2 - \beta^2] \Psi = 0 \tag{2}$$

式(2)中, k_0 为中心波长所对应的传输矢量, $\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$ 为模式传输常数, n_{eff} 是光纤芯区的有效折射率,式(2)的一个解为 $\Psi_i = \Psi_0 e^{-i\beta z}$ 即光纤中的传输光波。当入射光进入光纤后,还将产生散射波 Ψ_s , 散射光场中实际上包含有各种不同的频率,所以 Ψ_s 应是一个付里叶积分式,光纤中的总的场由入射光和散射光构成,即 $\Psi = \Psi_i + \Psi_s$ 。将 Ψ 代入式(2),并考虑仅对某一种频率的反射情况,可以求得其对应的散射光波的振幅,进而求得光栅的反射率 R 为:

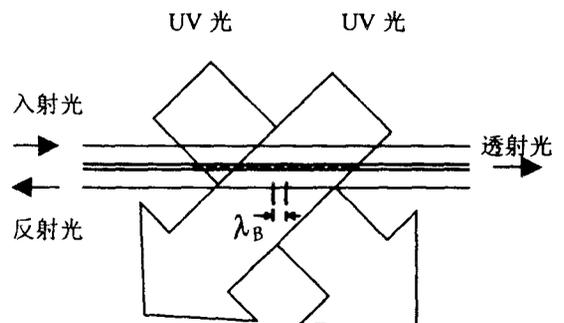


图 4 光纤光栅制作方法

$$R = \frac{\xi^2 \sinh^2(\Omega L)}{\Omega^2 \cosh^2(\Omega L) + \delta \beta^2 \sinh^2(\Omega L)} \quad (3)$$

式(3)中, L 是光栅长度, ξ 是耦合系数, $\delta\beta = \beta - \pi/\Lambda$, $\Omega = \sqrt{\xi^2 - \delta\beta^2}$, 当 $\delta\beta = 0$, R 有最大值 $R_{\max} = \text{tgh}^2(\xi L)$, 即有 Bragg 条件 $2n_{\text{eff}}\Lambda = \lambda_B$ 当宽带光波在光栅中传输时, 只有满足 Bragg 条件的波长被反射, 这样光纤光栅就起到了光波选择反射镜的作用。图 4 为光纤光栅形成的基本原理图, 两束相干的紫外(UV)激光在光纤上发生干涉, 改变两束光间的夹角, 可以在光纤上写入周期不同的光栅。

4 光纤光栅在 WDM 系统中的应用

由于光纤光栅具有良好的波长选择性, 用它可以方便地实现 WDM 系统的全光解复用, 如图 5。

虚线左边是 Michelson 干涉仪, 虚线右边是 Mach-Zehnder 干涉仪, 光栅的 Bragg 波长为 λ_B 。从 1 端口入射的光波复用信号 $P(\lambda_1 \cdots \lambda_B \cdots \lambda_n)$, 最后从 2 端口输出信号 $P(\lambda_B)$, 4' 端口输出余下的信号 $P(\lambda_1 \cdots \lambda_n)$ 。相反, 从端口 1 输入 $P(\lambda_B)$, 从 3' 端口输入 $P(\lambda_1 \cdots \lambda_B \cdots \lambda_n)$, 从 2 端口输出 $P(\lambda_1 \cdots \lambda_B \cdots \lambda_n)$ 。

除均匀周期性普通型 FBG 外, 还可以制成一些特殊的 FBG, 如非均匀的近似周期光栅的透射窗口位置可以随相移量的大小发生改变, 不同的相移值就会在反射谱阻带中的不同位置打开透射窗口, 这种特殊的相移 FBG 可直接用于光滤波和多波长信号的复接和分接解复用, 图 6 是一个解复用应用的例子。从单通道来的多波长信号被分成多路, 每一分路都配有 Bragg 相移光栅, 各光栅有不同的相移量, 因而可以对不同的波长进行选择。

综上所述, 随着紫外写入光栅制作技术的日趋成熟, 人们逐渐认识到光纤 FBG 在高速光纤通信系统中的重要应用价值, 尤其是在实现高速数据传输的 DWDM 和全光解复用中, 光纤光栅所起的重要作用更是其他元件无法替代的, 这一点已越来越为我们所共识。

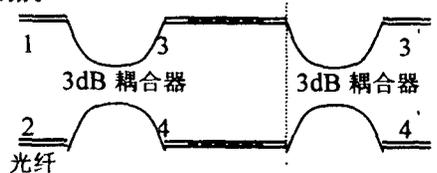


图 5 光纤带通滤波器

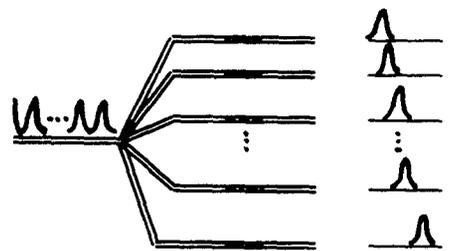


图 6 采用相移 FBG 的全光纤 WDM

参 考 文 献

- [1] Mizrahi V, Erdogan T, Digiovanni D j, et al. Four channel fiber grating demultiplex[J]. Electronics letters, 1994, 30(10):780 - 781.
- [2] 张 煦. 大容量、长距离光纤系统继续推进[J]. 光通信技术, 1999, 23(3):165 - 171.
- [3] Meltz G. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Opt Lett, 1989, 14(15):825.
- [4] 宁提纲, 文冀萍, 赵玉成等. 光纤光栅写入的最新进展[J]. 光通信技术, 1999, 23(4):282 - 284.

Optical Fiber Grating and Its Appliance in Wavelength Division Multiplex System

LI Wei-min, HUANG Hai-qing, WANG Yuan-yi

(The Telecommunication Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710077, China)

Abstract: We have analyzed the mechanism of fiber-optic Bragg grating formed by photo-induction process, such as transverse exposure on the side of the fiber with an interference pattern formed with an intense UV laser source to produce the index modulation or phase grating in the fiber core. And at last the paper introduces appliance of FBG in WDM system.

Key words: fiber Bragg grating (FBG); wavelength division multiplexer; demultiplexer