

密集型多重体全息光栅波长解复用技术*

忽满利¹, 周景会¹, 李艳辉¹, 刘继芳², 李育林³, 谭玉山⁴

- (1. 西北大学 物理系, 陕西 西安 710069; 2. 西安电子科技大学 技术物理系, 陕西 西安 710067;
3. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068;
4. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 阐述了光折变多重体全息光栅作为滤波器实现波长解复用的原理, 分析了滤波器的波长和角度选择特性, 对器件设计中要考虑的问题进行了讨论。提出了实现多重体全息光栅波长解复用的实验方案和实用化要解决的问题。

关键词: 波长解复用; 多重体全息光栅; 光折变效应

中图分类号: TN929. 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0327-04

Technique of wavelength demultiplexing with dense multiple volume holographic grating*

HU Man-li¹, ZHOU Jing-hui¹, LI Yan-hui¹, LIU Ji-fang², LI Yu-lin³, TAN Yu-shan⁴

- (1. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Department of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710067, China; 3. Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy and Sciences, Xi'an 710068, China;
4. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The principle of wavelength demultiplexing with multiple volume holographic grating filter is described. The selectivity of its wavelength and angle is analyzed and the wavelength spacing is discussed. One scheme of wavelength demultiplexing with multiple volume holographic grating filter and the technique difficulties to be resolved while being put into practice are put forward.

Key words: Wavelength demultiplexing; Multiple volume holographic grating; Photorefractive effect

0 引言

光通信技术中, 为充分利用光纤的巨大带宽资源, 增加单路光纤的传输容量, 常采用波分复用技术(WDM)^[1~2], 波分复用技术是在同一根光纤中同时

传送多路光载波的传输方式, 波长划分有一定的间隔, 不致发生相互串扰, 在光纤的输出端, 再用窄带滤波器将各个信道的载波区分开, 分别用不同的接收器探测。目前商用的复用器/解复用器(MUXs/DEMUXs)可做到一根光纤 4~8 通道的复用和解复用水平^[3], 但这远不能满足光通信高速发展的要求。低

收稿日期: 2003-10-20; 修订日期: 2003-11-15

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60047002); 西北大学科研基金资助项目(99nw35)

作者简介: 忽满利(1959-), 男, 陕西大荔县人, 副教授, 博士, 主要从事信息光学和光电子器件与技术研究。

损耗、小串扰、高可靠性可用于超高速、大容量密集 WDM 系统的 MUXs/DEMUXs 是光通信技术中迫切需要解决的技术问题。

实现波长复用与解复用的方法多种多样^[4-8],常用的有:介质薄膜滤波器(TFF)、光纤布拉格光栅(FBG)、阵列波导光栅(AWG)。三者各有优缺点:介质薄膜滤波器是常用的方法,信道间隔一般在 400~200 GHz 之间,具有尺寸小、易制作、温度灵敏度低、成本低等优点。缺点是插入损耗随信道数线性增加,不适用信道间隔 50 GHz 或更小的密集 WDM 系统。光纤布拉格光栅有 50 GHz 的信道间隔,易于和光纤元件整体集成,但器件难于制作。此外,FBGs 基本上是两端口器件,应用中需同光学环路器或耦合器串接使用,这必然要增加成本,同时也引入了显著插入损耗,造成器件性能稳定性差。阵列波导光栅尺寸小,信道间隔为 100 GHz 或更小,缺点是由于光纤和波导之间耦合,引入较大偏振损耗和插入损耗。

文中提出一种波长解复用技术的新方法——多重体全息位相光栅(MVHG)衍射法,该方法能克服现有波长解复用技术中的诸多不足,保持了三者所具有的一些优点,具有滤波带窄、信噪比高、信道串扰小、衍射效率高、温度敏感度低、寿命长、结构紧凑简单等特点。这种波长解复用技术不仅可以用于 WDM 技术中,解决光通信技术中超高速、大容量、密集型波长解复用的技术问题,还可以用于光谱探测、光纤光栅传感器、光互连、光学神经网络等方面。

1 基本原理

在这种波长解复用技术中,多重体全息光栅的设计与制作是非常关键的。目前一种简单有效的制作方法是利用光折变晶体(或有机光折变聚合物)的光折变特性,用光学全息方法在存储材料中存入多重体全息光栅^[9-10];当两束平面光波在晶体中发生干涉,形成周期性空间光场分布,光致空间电荷由光亮区迁移至光暗区,导致周期性空间电荷分布,从而形成相应于光场分布的空间电场,再通过线性光电效应,在晶体内形成折射率调制的周期位相变化,即相位光栅。记录多重光栅时,保持两光束波长和夹角不变,转动晶体,用同样的方法记录,这样能在晶体的同一

空间位置存入多个位相光栅,即多重全息光栅。这些光栅的矢量大小相等,方向不同。波长解复用时,利用体全息光栅的布拉格(Bragg)衍射特性来实现密集型波长解复用:一定角度入射的多波长光信号,只有波长满足 Bragg 条件的入射光,才会在相应的方向上有衍射光输出,每个波长信号光都有各自对应的 Bragg 衍射条件和衍射角度,这样方向相同、波长不同的入射信号光波在空间方向上被区分开,经过光学耦合器件,将衍射输出光耦合到输出光纤中,达到波长解复用的目的。此外,只要简单增加多重全息光栅的数量,就能很容易扩充解复用的信道数。波长解复用通过一次衍射完成,没有通常的插入损耗积累。

2 理论分析

考虑信号光和参考光在光折变晶体中分别以角度 θ_{w_1} 和 θ_{w_2} 对称入射($\theta_{w_1} = \theta_{w_2} = \theta_w$)的两束相干光,其波长为 λ_w ,通过光折变效应,记录一个全息光栅,如图 1 所示,则有关系 $\sin(\theta_w) = 0.5\lambda_w/\Lambda n$,其中 Λ 为光栅周期, n 为晶体折射率。转动晶体,在晶体的同一空间位置存入多重全息光栅。

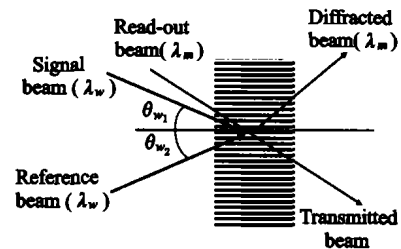


图 1 全息光栅记录和读出方案

Fig. 1 Geometry for recording of holographic grating and read-out scheme

解复用时,方向相同的多波长光以一定角度入射到多重全息光栅,在满足 Bragg 的条件下,波长不同的衍射光在空间方向上彼此分开。如图 2 所示, BA_m, BA_{m+1} 分别是其中的两个光栅,波长为 λ_m ,方向为 O_mB 的入射光波矢为 k_m ,满足 Bragg 条件的衍射方向为 O_mA_m ,而波长为 λ_{m+1} ,入射方向相同的另一光波的波矢为 k_{m+1} ,衍射方向为 $O_{m+1}A_{m+1}$,于是有关系:

$$\theta_m = \sin^{-1}(\lambda_m/\lambda_w \sin\theta_w) \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中 θ_m 是入射光同 $O_m P_m$ 之间的夹角(注意到 $O_m A_m$ 和 $O_{m-1} A_{m-1}$ 之间夹角为 $2\delta\theta$)。

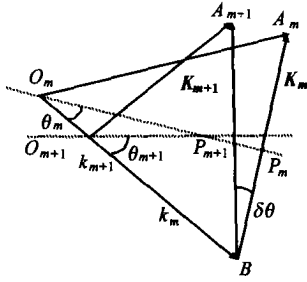


图2 两通道波长解复用时波矢量间关系

Fig. 2 Relations of wave vectors for wavelength demultiplexing of two channels

根据这一方程,由波长 λ_w 和衍射角度 θ_m 能确定衍射波长 λ_m 。如果相邻两光栅矢量间的夹角为 $\delta\theta$,由图2易知, $\theta_m = \theta_w + m\delta\theta$,取 $\lambda_m = \lambda_w + m\delta\lambda$,代入公式(1),则有关系式^[3]:

$$\delta\theta = \frac{1}{m} \sin^{-1} \left[\left(1 + \frac{m\delta\lambda}{\lambda_w} \right) \sin\theta_w \right] - \frac{\theta_w}{m} \quad (2)$$

波长间隔 $\delta\lambda$ 和通道数 m 确定之后,由上式可确定晶体转角 $\delta\theta$ 大小。图3给出了 $m=16, \lambda_w=514.5 \text{ nm}$,

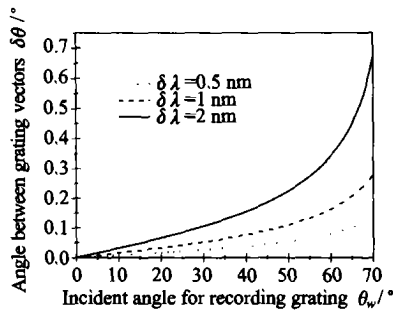


图3 光栅矢量夹角同入射角之间的关系

Fig. 3 Angle between grating vector as a function of incident angle θ_w

通道间隔 $\delta\lambda$ 分别是 0.5、1、2 nm 时, $\delta\theta$ 和 θ_w 的关系曲线。由图可见,输入值在 $0 \sim 50^\circ$ 内, $\delta\theta$ 和 θ_w 接近线性关系,当 $\theta_w = 25^\circ$ 时, $\delta\theta$ 约为 0.1° , $m\delta\theta$ 较小时,由公式(2)得到关系:

$$\delta\theta = \frac{1}{\lambda_w} \delta\lambda \text{tg}\theta_w \quad (3)$$

由于体全息光栅有一定的厚度,因此 Bragg 衍射角有一定扩展宽度 $\Delta\theta$,其大小与光栅厚度 d 有关:

$$\Delta\theta = \frac{\Lambda}{d} \quad (4)$$

注意两通道衍射光之间的夹角为 $2\delta\theta$,且不小于 $\Delta\theta$,由公式(3)和(4)可以得到全息光栅的滤波宽度^[3]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_w^2 \cos\theta_w}{4dn \sin^2\theta_w} \quad (5)$$

图4给出了光栅厚度 d 分别为 2、5、10 mm,写入光波长为 514.5 nm,最小通道间隔 $\Delta\lambda$ 同记录光栅时入射光夹角 θ_w 的关系,随入射角的增加,通道间隔

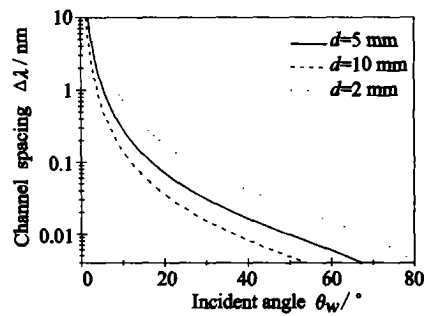


图4 通道间隔随光栅矢量夹角的关系

Fig. 4 Channel spacing as a function of angle between grating vectors

将迅速减小,光栅厚度越厚,通道间隔越小,也就是说,对于密集型波长解复用器, d 和 θ_w 不能取得太小。

在没有吸收情况下,光栅的衍射效率 η 为:

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n l}{\lambda_n \cos\theta_n} \right) \quad (6)$$

式中 Δn 是光致折射率变化量; l 为两光束在晶体中的作用长度。借助于以上方程,可以确定体全息光栅波长解复用器的主要参数。

3 实验方案与设计

写入光栅时,可采用 90° 光路 ($\theta_w = 45^\circ$),如图5所示, s 参考光和信号光的入射角相同, $\theta_{w_1} = \theta_{w_2} = 45^\circ$ 。记录一个光栅后,保持两入射角 45° 不变,转动晶体,转角大小由公式(3)确定。如果通道数 $m=16$,通道间隔取 2 nm,则 $\delta\theta$ 约为 0.08° ,晶体厚度为 2 mm 时, Bragg 角的扩展宽度 $\Delta\theta \approx 0.007^\circ$,显然,相邻两通道光信号在空间角度上完全可以分开。记录

多重光栅时,可采用精密旋转平台控制晶体的转角大小,旋转平台由计算机通过步进电机控制,最小转角可达 0.0003° ,因此完全可以满足要求。

值得注意的是,由于光折变晶体中相位栅的写入和擦除时间具有不对称性,当写入一个光栅时,记录光波会对已写入的光栅有擦除作用,需要采用时间递减曝光法,使记录的全息光栅具有均匀的衍射效率,其曝光时间由下式给出:

$$t_n = \frac{t_1}{1 + (N-1)/\beta} \quad (7)$$

式中 t_1 为记录第一个光栅所需时间; β 是擦除时间常数同记录时间常数之比(τ_e/τ_r); N 为记录多重全息光栅总数。为了使记录的光栅不被光擦除,通常采

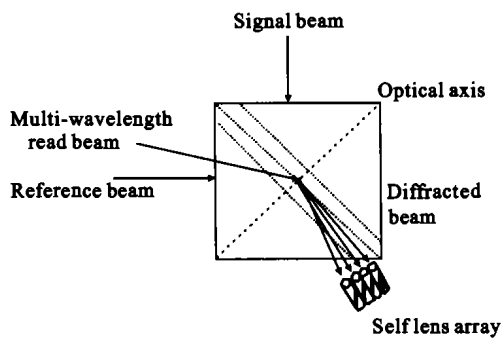


图 5 波长解复用实验原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the proposed experimental setup for wavelength demultiplexing

用热固定方法,即在光栅记录过程结束后,将晶体加热到 $150^\circ\text{C} \sim 180^\circ\text{C}$,以便热激活离子中和电子空间电荷场,然后将晶体冷却到室温,再经过均匀光照射,使离子电荷光栅保持下来,这种离子电荷光栅不受光照影响,是稳定的,只有经过加热才能被擦除掉。

解复用时,来自光纤的信号光强一般比较弱,而掺杂光折变晶体对入射光有散射和吸收作用,当晶体总掺杂浓度一定时,对晶体需做适当氧化和还原处理,以保证晶体具有适当的散射和吸收,同时具有较大动态范围^[9],动态范围决定了晶体的存储容量^[10]。氧化过重,则动态范围变小,还原处理过深,则晶体吸收增大,因此需要综合考虑。

4 结 论

相对于光折变全息存储器,光折变全息光栅解复用器对存储在晶体中的光栅数量要求不高,理论上讲这种复用器容易实现,但是光通信中信号光波较弱,晶体的吸收和散射作用等问题比较突出,这是器件设计和制作中要考虑的问题,文中未对这一问题作深入讨论,这一技术距实用化还有一定距离。

参考文献:

- [1] Borella M S, Jue J P, Banerjee D, et al. Optical components for WDM lightwave networks[J]. Proceedings of IEEE, 1997, 85 (8):1274-1307.
- [2] Brackett C A. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and application[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1990, 8: 948-964.
- [3] An J W, Kim N, Lee K W. Volume holographic wavelength demultiplexer based on rotation multiplexing in the 90° geometry [J]. Opt Commun, 2001, 197: 247-254.
- [4] Okamoto K, Yamada H. Arrayed-waveguide grating multiplexer with flat spectral response[J]. Optics Lett, 1995, 20(1): 43-45.
- [5] Jerry Bautista, Robert Shine. Filter technologies vie for DWDM systems application[EB/OL]. <http://www.fiberopticonline.com>.
- [6] Simt M K. New focusing and dispersive planar component based on an optical phased array[J]. Electron Lett, 1988, 24(7): 385-386.
- [7] Jung D K, Lee C H. Wavelength-division-multiplexed passive optical network based on spectrum-slicing techniques[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(9):1334-1336.
- [8] Robert T James, Christopher Wah, Keigo Lizuka, et al. Optically tunable optical filter[J]. Appl Opt, 1995, 34(35): 8230-8235.
- [9] Burr G W, Psaltis D. Effect of the oxidation state of LiNbO_3 : Fe on the diffraction efficiency of multiple holograms[J]. Optics Lett, 1996, 21(12):893-895.
- [10] Moke F H, Burr G W, Psaltis D. System metric for holographic memory system[J]. Optics Lett, 1996, 21(12): 896-898.