

光折变多重体光栅的制作及应用*

王二虎 赵建林** 李继锋 向红丽 杨德兴 向 强

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所,西安 710072)

摘 要 根据光折变多重体光栅的滤波原理,在 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ 的 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中利用循环曝光法写入了光栅波矢夹角为 0.037° 且衍射效率均衡的 8 重体光栅,实验上证实了光写入多重光折变体光栅应用于波分复用系统的可行性. 利用 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体制作了一个原理性双通道波分复用器,成功地实现了对相同方向入射的波长分别为 635 nm 和 650 nm 的两束光的有效分离,并根据布喇格条件,将光折变体光栅应用于光波波长的测量,测量精度可达 10 pm 量级.

关键词 多重体光栅;波分复用器;光折变效应

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

0 引言

伴随掺铒光纤放大器(EDFA)的实用化,密集型波分复用(DWDM)技术在近年来得到了迅速发展. 然而现有光通信系统常用的各种波分复用器件目前都存在着各自的缺陷,如熔融拉锥型波分复用器的隔离度差,一般不能用于 DWDM 系统;介质薄膜型波分复用器(dielectric thin film filters, TFFs)的插入损耗随着通道数的增加而增加,并且由于镀膜工艺的限制,使得该方法很难制作通道间隔小于 50 GHz 的密集波分复用器件;阵列波导光栅型(arrayed waveguide gratings, AWGs)波分复用器存在偏振相关损耗大和温度稳定性较差的缺点;光纤布喇格光栅型(fiber Bragg gratings, FBGs)波分复用器必须与其它器件(比如环形器)连接在一起才能实现波分复用功能,因而导致成本高、插入损耗大^[1]. 为此,近年来人们又将注意力投向了光折变体光栅器件^[2]. 光折变效应是指光折变材料在光辐照下,折射率随光强的空间分布而发生变化的现象. 最初由 Ashkin 等人于 20 世纪 60 年代在 LiNbO_3 和 LiTaO_3 晶体中发现^[3]. 光折变材料的特点是可以利用全息干涉法和相位掩模干涉法等来制作光折变体相位光栅. 它具有体积小、制作简单、易擦除、可以实时处理、衍射效率高、温度稳定性好、可以进行窄带滤波等优点,在波分复用系统中有着极大的潜在应用前景. 而 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体在 1550 nm 通信窗口处几乎没有光吸收,且光折变灵敏度很低,因而是光折变体光栅应用于光通信系统

的首选材料^[4]. 本文给出有关多重光折变体光栅的制作及其用于波分复用器件的实验研究结果.

1 理论分析

体光栅与平面光栅的不同点是:理想情况下,对应一束照明光波体光栅只能产生一级衍射,且满足布喇格条件

$$2\Lambda \sin \theta_b = \lambda \quad (1)$$

式中 λ 为入射光波波长(真空中), Λ 为光栅常数, θ_b 为相应的布喇格角(真空中). 由式(1)可知,当光栅常数一定时,不同的入射波长对应着不同的布喇格衍射角. 假设采用双光束干涉,以波长为 λ_w 的平面光波在光折变晶体内对称地写入体全息光栅,且参物光束夹角为 $2\theta_w$. 则当以波长为 λ_p 的光波照射该体光栅时,设其相应的衍射角为 θ_p ,则 θ_p 满足关系

$$\frac{\sin \theta_w}{\sin \theta_p} = \frac{\lambda_w}{\lambda_p} \quad (2)$$

式(2)是利用体光栅进行波分复用的基本公式^[2],它提供了将光折变体光栅应用于光纤通信的可能性. 由于 θ_w 和 λ_w 的值可以根据记录条件来确定,因此只要测量出波长 λ_p 的布喇格衍射角 θ_p 就能根据式(2)计算出 λ_p 的值.

根据这一思路,可以在光折变晶体中写入具有不同取向的多重体光栅,使得当一束含有多个不同波长的光束照射光栅时,不同波长的光波都有不同取向的光栅使之满足布喇格条件,从而在不同方向出现相应波长的衍射光,实现波分解复用的目的. 图 1 以双通道的波分复用器为例,用波矢图解释了这种波分解复用器件的工作原理^[5]. 假设两个光栅波矢分别为 k_1 和 k_2 ,同方向入射到晶体的读出光波矢量分别为 k_{m1} 和 k_{m2} ,根据布喇格条件,中心波长分别为 λ_{m1} 和 λ_{m2} 的入射光波将沿着 k'_{m1} 和 k'_{m2} 方向衍射,从而将同方向入射的两个不同波长的光波分开.

* 国家自然科学基金(60077018)和西北工业大学研究生创业种子基金(Z20030091)资助项目

** Tel:029-88495724 Email:jlzhao@nwpu.edu.cn

收稿日期:2004-06-22

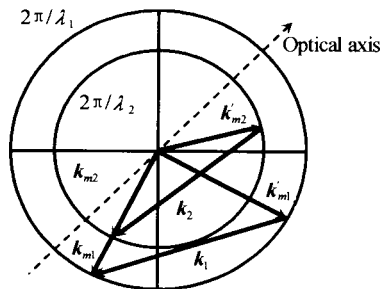


图 1 双光栅波长解复用的波矢图
Fig. 1 Wave-vectors of wavelength demultiplexing with double gratings

2 多重体光栅的制作及滤波特性

多重光栅的写入可采用角度复用的方法^[5,6], 其具体的写入方式有三种, 即使参物光同步地相对晶体的表面法线改变; 将两写入光束之间的夹角固定而依次转动晶体; 固定一束光的方向, 依次改变另一束光的方向. 本文采用第二种写入方式, 这种方法所需的设备和光路都相对简单, 比较容易实现.

实验中记录多重体光栅的光路如图 2. 由 He-Ne 激光器出射的竖直偏振的细激光束经倒置望远镜 T 扩束准直后, 再经分光棱镜 BS 分为两束, 其中参考光束经反射镜 M_2 反射后入射到晶体前表面; 物光束经反射镜 M_1 反射后对称地入射到晶体前表面, 并与参考光束在晶体前表面相交. 两光束在入射点的强度比约为 2:1. 晶体光轴沿水平方向, 因此, 两光束进入晶体后为寻常光. 晶体样品置于精密旋转台的中心, 精密旋转台的旋转角通过计算机控制, 精度可达 0.001° .

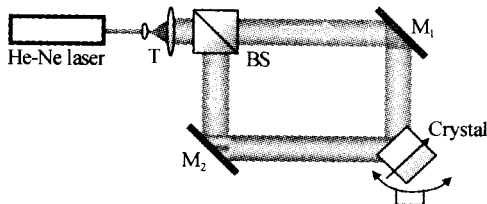


图 2 多重光折变体光栅记录光路
Fig. 2 Experimental setup for recording multiple volume gratings in photorefractive crystals

实验所用晶体样品为 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$, 掺 Fe 浓度为 0.05% wt, 几何尺寸为 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$. 实验中取写入光束的光斑直径为 4.0 mm, 参物光束夹角固定为 89.682° . 采用循环曝光法^[7]记录光栅, 即第一个光栅记录 Δt 时间后, 通过计算机控制旋转台使晶体作微小转动, 再记录第二个光栅 Δt 时间, 以此类推, 共记录了 8 重光栅. 之后再把晶体回转至记录第一个光栅位置处, 重复上述步骤, 如此循环多次, 直至各光栅的衍射效率到达合适的值. 这种方法能够保证晶体中每重光栅的写入时间基本相同,

因而使衍射效率相差不大. 实验中, 相邻两个光栅的夹角为 0.037° . 写入过程完成后, 挡住物光束, 仅让参考光束照射晶体中写入的体光栅, 并分别测量其衍射光和透射光强度. 考虑到晶体的吸收、散射及表面反射等因素, 以衍射光强度除以衍射光与透射光强度之和来计算衍射效率. 通过旋转台旋转晶体, 测量出衍射效率随参考光束入射角的变化关系, 如图 3. 图中横坐标表示照射光束的入射角度, 纵坐标表示不同入射角下体光栅的衍射效率. 根据体全息理论, 当入射光严格满足布喇格条件时, 衍射光强度达到最大, 分别对应图 3 中曲线的 8 个峰值. 实验中, 不同角度下出现的布喇格衍射现象说明晶体中不同方向的光栅分别对应着不同的布喇格角. 利用这些布喇格角的数值, 根据式 (2), 就可以计算出各光栅所对应的的中心波长 (如表 1). 可以看出, 光栅夹角为 0.037° 时, 对应的不同通道的中心波长间距约为 0.41 nm.

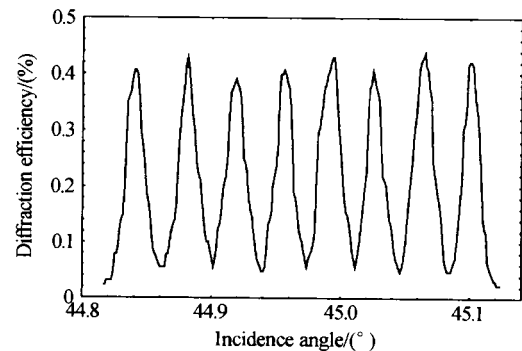


图 3 多重体光栅衍射效率与入射角的关系曲线
Fig. 3 Relationship between diffraction efficiency and incident angle of multiple volume gratings

表 1 不同布喇格入射角对应的衍射波长

No.	Bragg angle/ $^\circ$	Center wavelength/nm
1	44.841	632.80
2	44.879	633.22
3	44.916	633.63
4	44.953	634.04
5	44.990	634.45
6	45.027	634.86
7	45.064	635.27
8	45.101	635.68

当一束包含表 1 中给出的 8 个波长的平行光以 44.841° 入射到体光栅上时, 这 8 个波长都只有一个对应的体光栅使之满足布喇格条件, 导致了各波长衍射光的分离, 其波矢图与图 1 类似. 根据这种方法, 可以通过严格控制晶体转动的角度 (即光栅间的夹角) 写入多重体光栅, 实现不同通道间隔的波分复用器件. 图 4 给出了波分解复用的示意图.

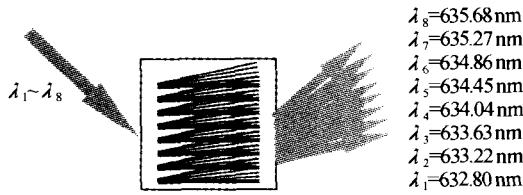


图 4 八通道波分复用器
Fig. 4 Sketch of WDM with 8 channels

3 双通道波分复用器的设计

按照图 2 光路,在块状 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中写入两重光栅,两光栅之间夹角为 1.338° 。读出光路如图 5,激光二极管 LD1(波长为 635 nm)和 LD2(波长为 650 nm)通过非偏振分光棱镜 BS 合并到一起以入射角 44.841° 入射到晶体表面,这时晶体中写入的两个光栅分别满足波长为 635 和 650 nm 的入射光波的布喇格条件。在衍射光方向将会看到这两种光波的衍射斑同时出现。将毛玻璃置于 CCD

之前使衍射光强度衰减后记录下衍射光斑,得到如图 6(a)所示结果。分别挡住两束入射光,记录下各自的衍射光斑,结果如图 6(b)、6(c)。图中左侧光斑是波长为 650 nm 入射光的衍射结果,右侧光斑是波长为 635 nm 入射光的衍射结果。从实验结果可以看出,用多重光折变体光栅衍射的方法可以很容易地实现波分复用的功能。

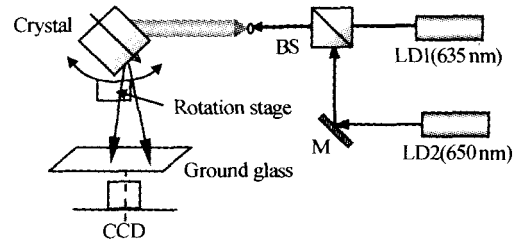


图 5 双通道波分解复用器的实验光路
Fig. 6 Experimental setup for wavelength division demultiplexing with two channels

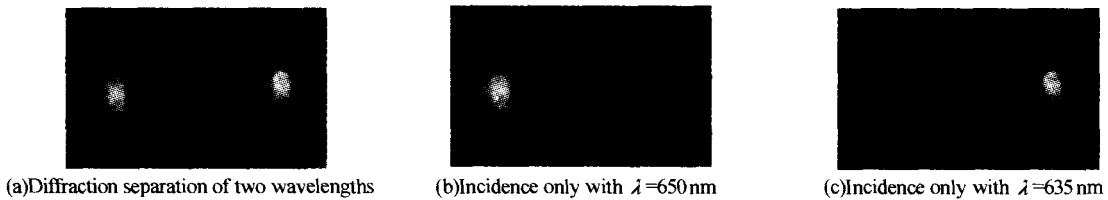


图 6 双波长解复用的实验结果(650 nm,635 nm)

Fig. 6 Experimental results of wavelength division demultiplexing with two channels (650 nm,635 nm)

4 利用光折变体光栅测量光波波长

采用实验光路图 2,取夹角为 60° 的参物光对称地入射到 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体的前表面,在晶体中写入体光栅。待写入过程完成后,挡住物光,仅让参考光照射晶体。将待测光束利用非偏振分光棱镜 BS 耦合到参考光束中(如图 7),并入射到晶体表面。通过计算机控制旋转台使晶体作微小转动,测量两次衍射效率达到峰值时对应的入射角,即测量出 θ_o 和 θ_p 的值。那么,以 He-Ne 激光器波长 $\lambda_o = 632.8 \text{ nm}$ 为基准,根据式(2)就可以计算出 λ_p 的值。本实验中,测量了半导体激光泵浦固体激光器(标称波长 532 nm)和激光二极管(标称波长 635 nm)输出光束的波长值,实验结果如表 2。可以看出,用光折变体光栅可以简单有效地测量出光波波长,测量精度在 10 pm 量级。与传统的光刻式光栅相比,光折变体光栅具有制作简单,重复性好,易擦除等优点。

表 2 利用光折变体光栅测量波长的结果

标称值/nm	$\theta_o/(^\circ)$	$\theta_p/(^\circ)$	测量值 λ_p/nm	测量误差/nm
532	29.996	24.855	532.025	0.025
635	29.966	30.111	634.999	0.001

5 结论

从理论上分析了利用在 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体中写入的多重体全息光栅实现波分复用的可行性。作为验证性实验,用 He-Ne 激光写入了 8 重衍射效率相近的体光栅,可用于波长在 632~635 nm 附近通道间隔为 0.41 nm 的波分复用器。进而用相同方法制作的双波长波分解复用器实现了波长为 635 nm 和 650 nm 两束光的分离。此方法制作波分复用器简单易行,且具有温度响应小、可复用通道数目多、可以重复使用等优点。但是目前这种方法依然存在很多问题,比如衍射效率不高,串扰较大等。若能很好地解决这些问题,光折变体光栅必将在光通信网络中发挥重要作用。最后,利用光折变体光栅布喇格入射角与衍射波长的关系,准确地测量了光波波长,测量精度在 10 pm 量级。

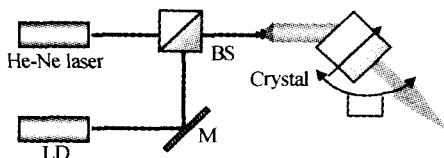


图 7 波长测量的实验光路
Fig. 7 Experimental setup for wavelength measurement

参考文献

1 黄章用. 光纤通信用新型光无源器件. 北京:北京邮电大学出版社,2003. 155~181
Huang Z Y. Novel passive components in fiber

- communications. Beijing: Press of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2003. 155~181
- 2 Boffi P, Piccinin D, Ubaldi M C. Infrared holography for optical communications, Techniques, Materials, and Devices. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 157~176
 - 3 刘思敏, 郭儒, 凌振芳. 光折变非线性光学. 北京: 中国标准出版社, 1992. 1~4
Liu S M, Guo R, Ling Z F. Photorefractive nonlinear optics. Beijing: Standard Press of China, 1992. 1~4
 - 4 Breer S, Buse K. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate. *Appl Phys, B*, 1998, **66**(3): 339~345
 - 5 An J W, Kim N, Lee K W. Volume holographic wavelength demultiplexer based on rotation multiplexing in the 90° geometry. *Optics Communications*, 2001, **197**(4-6): 247~254
 - 6 Mok F H. Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate. *Optics Letters*, 1993, **18**(11): 915~917
 - 7 Taketomi Y, Ford J E, Sasaki H, et al. Incremental recording for photorefractive hologram multiplexing. *Optics Letters*, 1991, **16**(22): 1774~1776

Fabrication and Application of Photorefractive Multiple Volume Gratings

Wang Erhu, Zhao Jianlin, Li Jifeng, Xiang hongli, Yang Dexing, Xiang Qiang

Institute of Optical Information and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

Received date: 2004-06-22

Abstract Based on the filtering principle of photorefractive multiple volume gratings, superposition of eight volume gratings at the angle 0.037 degree between the grating wave vectors in the $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ crystal with size of $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ has been obtained by using incremental recording method. Those gratings have approximately the same diffraction efficiency. So the application of multiple volume gratings in wavelength demultiplexing system is demonstrated by the experiment. Furthermore, a double wavelength filter using the $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ crystal has been made. Two light beams with the wavelength of 635 nm and 650 nm illuminating the volume gratings in the same direction have been separated by the filter successfully. According to the Bragg condition, the volume grating is used to measure the wavelength of light wave, and the measurement accuracy can reach the order of 10 pm.

Keywords Multiple volume gratings; Wavelength division multiplexing; Photorefractive effect

Wang Erhu was born in Shaanxi Province in 1979. He received his M. S. degree from Northwestern Polytechnical University in 2004. His major research fields include the recording method and applications of photorefractive multiple volume gratings.

