

# 用于 WDM 的多重体光栅曝光方法及 层状体全息光栅的研究

杨德兴, 郭夏锐, 王海滨, 赵建林, 张鹏, 向红丽

(西北工业大学 理学院 光信息技术研究所 光信息技术陕西省重点实验室, 西安 710072)

**摘 要:**本文针对层状多重体全息在红外通讯波段分光滤波的应用, 分析了其布喇格匹配与衍射效率均匀性问题. 给出了在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  光折变晶体中制作层状多重体全息光栅的几种方法. 利用双片光干涉在直接分层结构中写入了三层光栅, 光栅层厚 1 mm, 层间距 2 mm, 每层复用了四个光栅. 对这三层光栅的分析测试表明, 12 个光栅的衍射效率均匀, 相邻通道间隔约 3 nm. 实验结果表明, 这种层状结构的多重体全息光栅有希望用来组成具有大量通道数的 WDM 系统中的复用/解复用器件.

**关键词:**体全息光栅; 全息记录; 波长解复用

**中图分类号:** TN252

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2007)11-1975-4

## 0 引言

体光栅具有严格的波长选择性与角度选择性, 一定角度入射的多波长光信号, 只有当波长满足布喇格条件时, 才会在相应的方向上有衍射光输出. 如果按照一定方式在一块光敏感材料中写入多重体全息光栅, 当方向相同、波长不同的入射信号光波入射到多重体全息光栅上时将会在空间方向上以不同的角度区分开来, 再经过光学耦合器将衍射光耦合到光纤后即可达到波长解复用的目的<sup>[1]</sup>. 2002 年报道了采用这种技术在光致聚合物中制作的一种 50 GHz 的 42 信道波长解复用实验系统<sup>[2]</sup>. 2002 年, Ph. Dittrich 等人利用带间光折变效应, 在纯质  $\text{KNbO}_3$  晶体中记录了 3 dB 带宽为 0.13 nm 光栅滤波器, 具有很高的波长选择性<sup>[3]</sup>. 2003 年, O. Beyer 等人在聚合物中记录了四重光栅, 其衍射效率高达 99%<sup>[4]</sup>. 这些工作都是在整块材料中形成多重体光栅. 但由耦合波理论<sup>[1]</sup>发现, 如果要在  $\text{LiNbO}_3$  晶体中获得较高衍射效率的多重体光栅, 由于其动态范围的限制, 在同一个区域重叠的光栅数量一般不超过 10 个, 因而满足波分复用应用的通道数也受到限制. 本文通过在晶体中进行分层记录的方式, 在每一层中分别形成多重光栅以便在同样体积大小的晶体中制作更多数量的体光栅, 从而达到增加解复用通道数的目的.

## 1 多重光栅曝光时间与衍射效率

光折变晶体中的全息记录是一个动态过程, 后

续光栅的记录会部分擦除先前写入的全息光栅, 为了得到衍射效率均匀的多重体全息光栅, 在研究体全息存储时人们提出了各种形式的曝光方法, 其中一种较常用的方法为时间递减曝光法<sup>[5]</sup>. 时间递减法中曝光时间序列的选取依赖于写入和擦除过程中折射率调制度随时间变化的指数特性, 其目的是为了获得相同的衍射效率. 对于全息存储, 由于所有全息图(全息光栅)的读出波长一般都相同, 因此其确定曝光参数的依据是获得相同的折射率调制度. 然而, 在通讯解复用应用中, 每一个光栅对应的波长都不同, 且随着光通讯波段的不断展宽, 波长差异会越来越大. 因此, 必须考虑波长变化带来的影响<sup>[6]</sup>. 对于利用线性电光效应的光折变材料, 折射率调制度  $\Delta n$  为

$$\Delta n = \frac{1}{2} n^3 \gamma E_{sc} \quad (1)$$

式中  $\gamma$  为电光系数、 $E_{sc}$  为空间电荷场. 如果已知读出时需要达到的光栅衍射效率, 就可以由下式<sup>[7]</sup>

$$\eta = \sin^2 \left[ \frac{\pi d \Delta n}{\lambda \cos \theta} \right] \quad (2)$$

确定读出时对应的折射率调制度  $\Delta n_r$ , 再由式(1)确定需要达到的写入折射率调制度

$$\Delta n_w = \Delta n_r \left( \frac{n_w}{n_r} \right)^3 \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_r} \right) \quad (3)$$

式中,  $n_w$ 、 $\gamma_w$  和  $n_r$ 、 $\gamma_r$  分别为介质相对于写入光和读出光的折射率、有效电光系数,  $\Delta n_r$  可由下式确定

$$\Delta n_{ri} = \frac{\lambda_i \cos \theta_i \arcsin \sqrt{\eta_0}}{\pi d} \quad (4)$$

同样由于多波长读出光中不同波长对应介质的折射率有差异, 同向入射的光波进入介质后各波光波的折射角不同, 也将会导致读出光偏离布喇格

角入射条件,影响多重光栅的衍射效率<sup>[8]</sup>.当各波长光对应的介质折射率分别为  $n_1, \dots, n_i, \dots, n_N (1 \leq i \leq N)$  读出光偏离光栅布喇格入射角的大小为

$$\Delta\theta_i = \arcsin [(\sin(\theta_r)/n_i) - \arcsin [(\sin \theta_r)/n_{N/2}]] \quad (5)$$

$\theta_r$  为在波长解复用时读出光在晶体外的入射角,式中第一项为读出光在介质内的实际折射角,第二项为中心波长  $\lambda_{N/2}$  的读出光在介质内的折射角.根据 Kogelnik 的体光栅耦合波理论,非倾斜透射式体全息光栅的衍射效率  $\eta$  可以表示为

$$\eta = (\nu \sin \sqrt{\nu^2 + \xi^2}) / (\nu^2 + \xi^2) \quad (6)$$

式中  $\nu$  为调制参量,  $\xi$  为计算参量.从式(5)、(6)可知,当光谱范围较宽时由于介质色散的作用,折射率发生明显变化导致  $\Delta\theta_i$  逐渐增大,衍射效率也逐渐减小.

## 2 分层结构多重体全息光栅

分层多重体全息光栅是指利用适当的光辐照方式在晶体中分出不同的薄层结构,并分别在薄层结构中制作体全息光栅.如图1,黑色片状区域表示光栅层,即在该层中记录多重光栅.灰色区域为光栅层之间的隔离层,隔离层中无光栅.这种分层结构可通过平面波导阵列与直接分层方法实现.

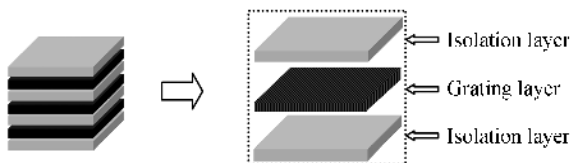


图1 层状光栅结构

Fig.1 Schematic diagram of layered grating

### 2.1 平面波导阵列分层结构

这种结构需要首先在记录介质中形成平面波导阵列,然后再通过适当的方式在平面波导中制作体光栅.本文通过在平面波导阵列中采用双光束干涉场直接写入(光写入法)<sup>[9]</sup>和对平面波导阵列的周期性擦洗(光擦洗法)<sup>[10]</sup>两种方法来形成体全息光栅.

#### 2.1.1 光写入法

平面波导阵列分层体全息光栅的光写入法是指利用空间频率不同的双光束干涉图样以一定的夹角先后两次或两对双光束同时辐照体块光敏感材料,在其中产生两种周期性折射率分布,两种分布的排列方向相互垂直.这种结构可以作为平面波导阵列布喇格光栅,其中与低、高空间频率的干涉图样对应的结构分别作为平面波导阵列和布喇格光栅,每个波导上都有布喇格光栅.在低频干涉图样写入平面波导阵列的基础上,如果利用高频干涉图样以不同角度多次曝光即可在波导中写入多重布喇格光栅,

从而形成平面波导阵列多重布喇格光栅.图2(a)为实验光路示意图.两束经扩束准直的连续波相干激光束,形成等强度干涉场.晶体以特定的空间取向置于干涉场中.图2(b)、(c)分别为采用低、高空间频率的干涉条纹辐照  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体写入平面波导阵列和布喇格光栅时,晶体在双光束干涉场中的空间取向.两次辐照过程中,通过将晶体旋转  $90^\circ$  实现空间取向的改变,通过调整两束写入光之间的夹角来获得不同空间频率的干涉条纹.

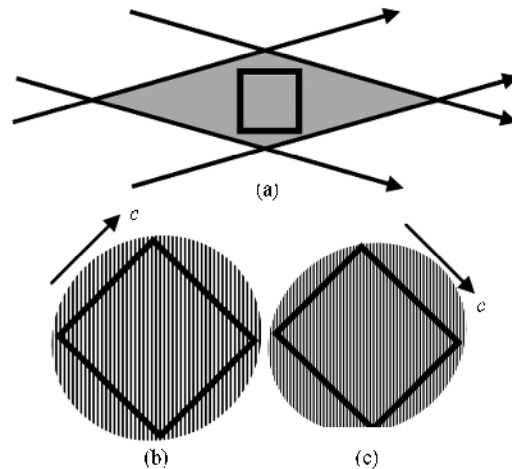


图2  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中光写入平面波导阵列体全息光栅示意图

Fig.2 Schematic diagram of writing VHG in PWA in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystal

#### 2.1.2 光擦洗法

另一种方法是通过对已形成的平面波导阵列的周期性擦洗来制作光栅.对于  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体来说,可通过这种方法在晶体中写入光栅向量垂直于晶体  $c$  轴的光栅.首先用空间频率较低的双光束干涉场照射  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体,在晶体中写入排列方向平行于晶体  $c$  轴的平面波导阵列.然后将平面阵列波导旋转  $90^\circ$ ,此时晶体的  $c$  轴垂直于入射面.然后用空间频率较高的双光束干涉场照射晶体,此时对于暗条纹区域来说,由于没有光照,其折射率没有发生变化,而对于被亮条纹照射的区域,由于亮条纹沿  $c$  轴的均匀照射产生的光擦洗使折射率逐渐减小直至趋于平均.所以在这种情况下,每层波导内就可形成折射率的周期性分布,即形成平面波导体全息光栅,光栅的向量垂直于晶体的  $c$  轴.

### 2.2 直接分层结构

直接分层结构是指通过两束平行片光以一定夹角形成的干涉场照射铌酸锂晶体,在片光照射的薄层内形成体全息光栅,通过移动晶体重复实验即可形成层状结构的体全息光栅.实验光路如图3,632.8 nm 的 He-Ne 激光束扩束准直后经过两个不同焦距的柱透镜压缩形成平行片光,经分光棱镜 BS

分为互相垂直的两束光,通过反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  以一定夹角<sup>[6]</sup>入射到晶体上,得到厚度(以片光峰值的 90% 作为光束的边界)约 1 mm 的平行片光.将晶体置于两束光重叠区域,其光轴平行于入射面.写入时双光束保持不变,仅转动晶体,即不改变光栅的写入角,每写入一个光栅,把晶体旋转一定角度后制作下一个光栅,这样可以在同一层内得到不同指向的多重光栅.然后把晶体向上移动一个微小距离(约 2 mm),再次用上述方式照射,从而得到分层结构的多重布喇格光栅.因其为片状结构宽度只有 1 mm 左右,因此可利用晶体的体积制作更多的体光栅.

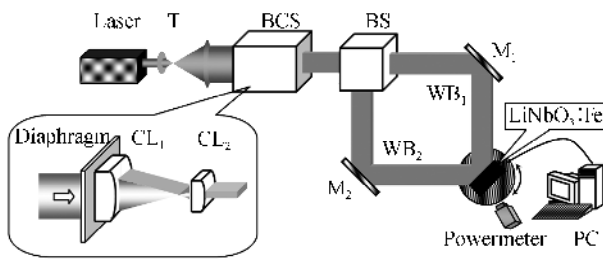


图 3 直接分层多重体全息光栅的写入实验光路

Fig. 3 Experimental setup for recording directly layered multiple VBGs

实验在一块  $2 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  的掺铁量为 0.05% 的  $\text{LiNbO}_3$  晶体中写入了三层结构,每一层中写入了四重体全息光栅.然后用 EXFO FLS-2300B ASE 宽带光源输出的通信波段光波 ( $1510 \text{ nm} \sim 1610 \text{ nm}$ ),经光纤准直器以设计好的布喇格角入射晶体,并用 Ando AQ6317C 光谱分析仪观测已写入的三层多重体全息光栅衍射谱.如图 4,所设计的波分复用器在红外通信波长上实现了衍射效率接近 25%,衍射均匀性约 1.5%,带宽约为 2 nm 的 12 通道滤波,它们的信道间隔约为 3 nm.图 5 为每一层所写入多重体光栅的滤波图,可以看出每层光栅都

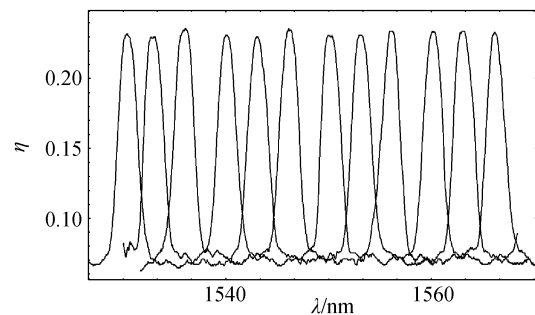


图 4 三层光栅的衍射效率

Fig. 4 Diffraction efficiencies of three layer gratings

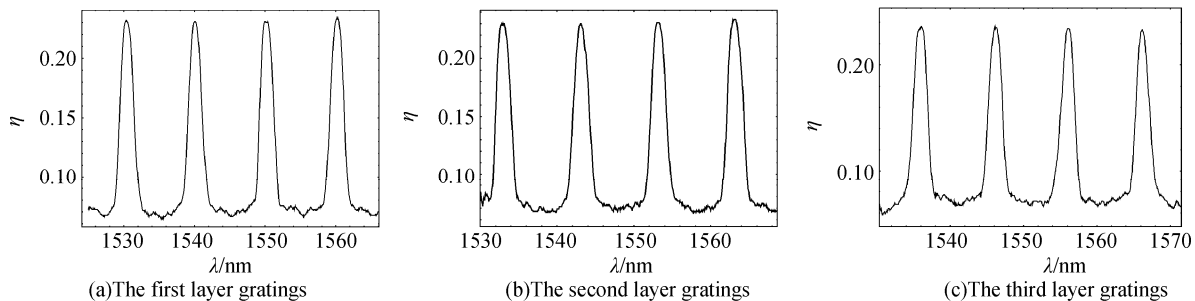


图 5 第一、二、三层多重光栅衍射效率

Fig. 5 Diffraction efficiencies of the first, second and third layer gratings

能衍射满足布喇格波长的光束,并且光栅的衍射效率不会因为分层而受影响.

### 3 结论

本文首先分析了用于宽光谱波长解复用的多重体全息光栅的光写入以及光栅衍射效率均匀性问题.给出了一种层状多重体全息光栅结构,这种结构可在不增加记录介质体积的情况下,增加可用于多波长滤波的体全息光栅数量.给出了在光折变  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  晶体中制作层状多重体全息光栅的平面驳倒阵列分层的光写入法与光擦洗法和直接分层的片光干涉法.利用双片光干涉方法在  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  晶体中写入了三层光栅,每层中复用了四个光栅.对这三层光栅的分析测试表明,12 个光栅的衍射效率均匀,相邻通道间隔约 3 nm.实验结果表明,这种层状结构的多重体全息光栅有希望用来组成具有

大量通道数的 WDM 系统中的复用/解复用器件.

#### 参考文献

- [1] BREER S, BUSE K. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate[J]. *Appl Phys B*, 1998, **66**(3): 339-345.
- [2] LEE K Y, AN J W, KIM N. Experimental demonstration of 50 GHz-spaced 42-channel volume holographic demultiplexer[J]. *Electronics Lett*, 2002, **38**(14): 730-732.
- [3] DITTRICH Ph, MONTEMEZZANI G, GÜNTHER P. Tunable optical filter for wavelength division multiplexing using dynamic interband photorefractive gratings[J]. *Opt Comm*, 2002, **214**(1-6): 363-370.
- [4] BEYER O, NEE I, HAVERMEYER F, et al. Holographic recording of Bragg gratings for wavelength division multiplexing in doped and partially polymerized poly(methyl methacrylate)[J]. *Appl Opt*, 2003, **42**(1): 30-37.
- [5] STRASSER A C, MANILOFF E S, JOHNSON K M, et al. Procedure for recording multiple-exposure holograms with equal diffraction efficiency in photorefractive media[J]. *Opt*

- Lett, 1989, **14**(1):6-8.
- [6] YANG De-xing, XIANG Hong-li, ZHAO Jian-lin, *et al.* The write-in characteristics of multiple volume holographic gratings for wavelength demultiplexing with wide spectra [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1):24-27.  
杨德兴, 向红丽, 赵建林, 等. 基于宽光谱应用的波长解复用多重体光栅的光写入特性[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1):24-27.
- [7] KOGELNIK B H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. *Bell Syst Tech J*, 1969, **48**(9):2909-2974.
- [8] TAO S Q, WANG B, WANG D Y. TWOR scheme for holographic wavelength filters[C]. *SPIE*, 2006. **6351**:6351W1-6351W8.
- [9] YANG De-xing, ZHANG Peng, ZHAO Jian-lin, *et al.* Planar waveguide array with Bragg grating and its fabrication method by laser irradiation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12):1432-1435.  
杨德兴, 张鹏, 赵建林, 等. 平面波导阵列布喇格光栅及其光辐照制作方法[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12):1432-1435.
- [10] YANG D X, WANG H B, ZHAO J L, *et al.* Light erasing method for fabricating plane waveguide volume holographic gratings in LiNbO<sub>3</sub> : Fe crystal [C]. *SPIE*, 2006. **6149**:6149Z-1-6149Z-7.

## Recording Method and Fabrication of Layered Multiple Volume Holographic Gratings for WDM

YANG De-xing, GUO Xia-rui, WANG Hai-bin, ZHAO Jian-lin, ZHANG Peng, XIANG Hong-li  
(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information, Institute of Optical Information Science and Technology,  
School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Received date: 2006-12-31

**Abstract:** For application to optical telecommunication band of layered multiple volume holographic gratings (VHG), the issue of Bragg match and the uniformity of diffraction efficiency are analyzed. Several approaches to fabricate multiple layered VHGs in LiNbO<sub>3</sub> : Fe crystal are illustrated. Three layer gratings with 1 mm thickness, 2 mm space and four gratings superimposed in each layer were written in a LiNbO<sub>3</sub> : Fe crystal by employing angle and space multiplexing techniques via two sheet beams interference. Measurement and analysis shows that twelve gratings in three layers with homogeneous diffraction efficiency and about 3 nm channel space were obtained.

**Key words:** Volume holographic grating; Holographic recording; Wavelength demultiplexing



**YANG De-xing** received the B. S. degree in physics from Sichuan University in 1987 and the M. S. degree in materials processing engineering from Northwestern Polytechnical University (NPU) in 1998 respectively. He is currently an associate professor in NPU, where he is deputy director of the Institute of Optical Information Science and Technology. His current research interests include optoelectronics devices, fiber optic sensor, and photonic crystal optics. He has published more than 40 journal articles. He is a senior member of the China Instrument and Control Society and a member of the Chinese Physical Society.