

文章编号: 1001-3806(2009)02-0113-04

## 正交读出方式体全息光栅通信波长衍射特性

郑小丹, 刘东, 陶世荃, 王大勇\*

(北京工业大学 应用数理学院, 北京 100124)

**摘要:** 为了寻求高质量和高密度的密集波分复用器件, 采用了在双掺铈铁的铌酸锂晶体中透射式记录/正交式读出方案制作体全息光栅的方法, 对体全息光栅衍射特性进行理论分析和实验验证。利用波长为 532nm 的激光记录尺寸为 1:1 的体全息光栅, 然后用中心波长为 1550nm 的红外通信波长成功读出, 取得了波长选择性为 0.5nm 的波长衍射特性数据。同时, 利用 2 维耦合波理论的闭形式解析解得到了该体全息光栅衍射效率随波长的变化关系。结果表明, 实验结果与理论预期相符合, 这一方法对制作体全息光栅密集波分复用器件的实用化是有帮助的。

**关键词:** 全息; 波长选择性; 密集波分复用; 透射式记录/正交式读出方案; 2 维耦合波理论

**中图分类号:** O438 **文献标识码:** A

## The diffractive characteristics at communication wavelengths of volume holographic gratings with the orthogonal readout scheme

ZHENG Xiao-dan, LIU Dong, TAO Shi-quan, WANG Da-yong

(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China)

**Abstract:** In order to obtain good quality and high-dense wavelength division multiplexing (DWDM) devices, the diffraction property of volume holographic gratings, produced in an iron and indium co-doped  $\text{LiNbO}_3$  crystal by means of the transmission writing and orthogonal readout (TWOR) scheme, was analyzed theoretically and verified experimentally. The volume holographic grating with a grating size ratio of 1:1 was recorded at the laser wavelength of 532nm, and was successfully read out by using a tunable laser at the central wavelength around 1550nm. Correspondingly, the wavelength selectivity of 0.5nm was achieved, which was measured as the 3dB bandwidth of the diffraction efficiency curve. Meanwhile, the relationship of diffraction efficiency versus reading wavelength for such a volume holographic grating was obtained with the corrected solution to the 2-D coupled-wave equation in closed mathematical form. The experimental results agreed with the theoretical prediction well, and they show that the presented method is helpful for making a practical holographic grating DWDM device.

**Key words:** holography; wavelength selectivity; dense wavelength division multiplexing; transmission writing and orthogonal readout scheme; 2-D coupled-wave theory

### 引言

目前波分复用器件在光通信系统和光纤传感系统中对于增强系统传输容量和应用灵活性正起着越来越重要的作用。例如, 马赫-曾德尔干涉仪、阵列波导光栅、平面光谱仪、方向耦合器等波分复用器件在光纤到户应用、光纤连接耦合、激光光源和探测器的兼容性等方面具有明显的优越性。波分复用器件要求通道数目

多、插入损耗低、波长选择性好和分光作用强。由于布喇格光栅器件(包括体全息光栅波分复用器件)具有高的波长选择性、高的角度选择性和高的衍射效率, 最近几年受到相当多的研究关注<sup>[1-10]</sup>。国内关于体全息光栅波分复用器件的研究较少, 尤其是针对第 3 通信窗口(1510nm ~ 1600nm)实际应用波段的研究还很少报道。在现有记录条件下, 通常记录体全息光栅的波长(如 532nm, 633nm 等)和红外通信波段(中心波长为 1550nm)相差较大, 一般难以满足布喇格衍射条件, 或者记录装置十分复杂。作者在掺杂铈酸铌( $\text{LiNbO}_3$ )晶体中采用透射式记录体全息光栅/正交式读出(transmission writing and orthogonal readout, TWOR)方案<sup>[9]</sup>研究了 532nm 激光记录的光栅对 1520nm ~ 560nm 通信波长的选择性, 得到了 3dB 带宽 0.5nm, 与 2 维耦合波理论计算结果一致。

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(4042010; 4071001); 北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目; 北京市教育委员会科技发展计划资助项目

作者简介: 郑小丹(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光学信息处理与光通信器件研究。

\* 通讯联系人。E-mail: wdyong@bjut.edu.cn

收稿日期: 2008-01-11; 收到修改稿日期: 2008-07-17

### 1 光栅记录角度的计算

由布喇格衍射条件可知,在读出体全息光栅时,波长偏离和角度偏离对于衍射特性的影响是等效的,读出光波长和读出角度的失配均可以使得衍射效率明显下降。对于一个已经记录好的体光栅,可以选择适当的读出波长,用波长偏离来弥补角度偏离,使得二者共同作用于相位失配的结果相互抵消,得到最高衍射效率。图1中给出了基于体全息的波分复用器件的新颖的记录、读出方案即 TWOR 方案<sup>[11]</sup>。记录介质为立

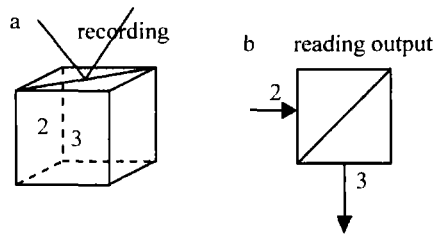


Fig. 1 Schematic diagram of recording and reading output a volume holographic grating for a single channel in the crystal

方块铌酸锂晶体,物光和参考光在面1对称入射,读出光在面2为邻面入射,衍射光从面3出射。记录时晶体放在V型支架上在面1记录,光路为透射式,读出时,参考光从面2入射,衍射光从邻面3出射。

晶体中记录的体全息光栅对特定波长的衍射效率取决于光栅的记录角度,对于给定的衍射波长和读出角度,只有以特定的角度记录光栅,才能使得该波长的衍射效率最大,从而实现对该波长的选择。图2中给出了用不同波长激光在晶体中记录、读出光栅的K矢量图。在满足布喇格衍射条件时,晶体中写入光波的

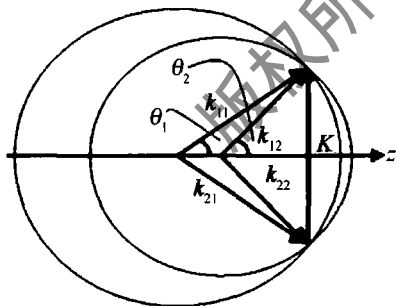


Fig. 2 The K vector diagram for different recording and reading wavelengths in the crystal

两波矢  $k_{11}, k_{21}$  和读出光波的两波矢  $k_{12}, k_{22}$  分别与光栅矢量  $K$  组成等腰三角形。设晶体中写入光波长为  $\lambda_1$ ,物光和参考光在晶体中与  $z$  轴的夹角分别为  $\theta_1$ ,所得光栅的光栅矢量为  $K$ 。当晶体中读出光波长为  $\lambda_2$  时,入射光和衍射光在晶体中与  $z$  轴的夹角分别为  $\theta_2$ 。

在晶体中,记录光波长、角度与读出光的波长、角度满足的关系式如下:

$$\sin\theta_1 = \frac{K}{2k_{11}}, |k_{11}| = \frac{2\pi}{\lambda_1} = \frac{2n_1\pi}{\lambda_{10}} \quad (1)$$

$$\sin\theta_2 = \frac{K}{2k_{12}}, |k_{21}| = \frac{2\pi}{\lambda_2} = \frac{2n_2\pi}{\lambda_{20}} \quad (2)$$

由(1)式和(2)式联立可得:  $\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{\lambda_{20}}{\lambda_{10}} \quad (3)$

记录光栅时,在空气和光折变晶体的界面上由折射定律可以得到,入射角和折射角应满足:

$$n_1 \sin\theta_1 = \sin\theta_{10} \quad (4)$$

$$n_i^2 = 4.9130 + \frac{0.1173 + 1.65 \times 10^{-8} T^2}{\lambda_{i0}^2 - (0.212 + 2.7 \times 10^{-8} T^2)^2} - 2.78 \times 0.01 \times \lambda_{i0}^2 \quad (5)$$

式中,  $i=1,2$ ;  $\lambda_1, \lambda_2$  分别是记录光和读出光在晶体中的波长,  $\lambda_{10}, \lambda_{20}$  分别是记录光和读出光在空气中的波长,  $\theta_1$  和  $\theta_{10}$  分别为晶体和在空气中的角度。  $n_i$  是给定波长在晶体中对应的折射率,  $T$  是晶体的绝对温度。在给定  $\lambda_{10}, \lambda_{20}$  以及空气中的读出角度  $\theta_{20} = 45^\circ$  的条件下,空气中记录光的入射角  $\theta_{10}$  可由(1)式~(5)式求出:

$$\theta_{10} = \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\lambda_{10}}{\lambda_{20}} \cdot n_2 \right) \quad (6)$$

表1中给出了通道间隔0.4nm的8个通信波长对应的写入角度。

Table 1 The recording angles of gratings according to different reading wavelength

reading output wavelength $\lambda_{20}/\mu\text{m}$	refractive index $n_2$	writing angle $\theta_{10}/(^{\circ})$	reading output wavelength $\lambda_{20}/\mu\text{m}$	refractive index $n_2$	writing angle $\theta_{10}/(^{\circ})$
1.5492	2.21286	32.502	1.5508	2.2128	32.464
1.5496	2.21284	32.493	1.5512	2.21279	32.454
1.5500	2.21283	32.483	1.5516	2.21277	32.444
1.5504	2.21281	32.473	1.5520	2.21276	32.435

### 2 实验条件

掺杂铌酸锂晶体(质量分数为0.0003的Fe,摩尔分数为0.005的In)对短波长激光的透过率低而在红外光波段尤其是通信用波长1520nm~1600nm处的透过率较高,因此,利用532nm记录光、1520nm~1600nm读出光通过透射式记录、正交式读出方案在

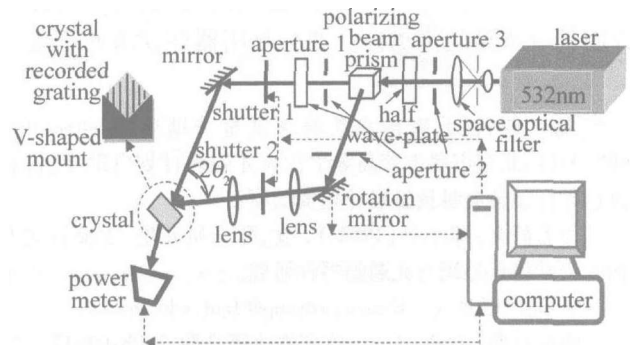


Fig. 3 The recording configuration in a doped LiNbO<sub>3</sub> crystal using 532nm laser

45°切割的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体中记录和读出体全息光栅,图3示出了具体的实验记录、读出光路。

如图3所示,激光器产生的波长为 532nm 的激光经扩束准直系统后由偏振分束棱镜分为两束光分别作为物光和参考光,物光和参考光在晶体内干涉形成体全息光栅。图4示出了读出光栅的光路图,通过改变可调谐激光器输出的波长,测量在给定读出角度时不同波长对应的衍射功率,从而得到衍射功率随波长的变化曲线。

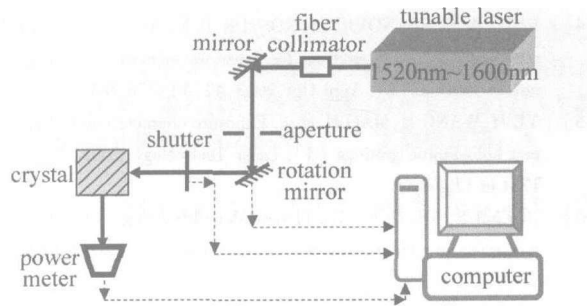


Fig. 4 The readout configuration using a 1520nm ~ 1600nm tunable laser

### 3 实验结果及分析

掺杂铈酸锂晶体(质量分数为 0.0003 的 Fe, 摩尔分数为 0.005 的 In) 的透过率随波长变化如图5所示,

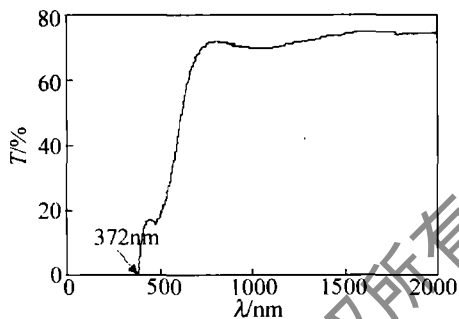


Fig. 5 The transmission spectrum of crystal

当 532nm 激光照射在晶体上时,大部分激光能量会在晶体表面一定深度内被吸收,通过物光与参考光的干涉在晶体内形成体全息光栅,物光和参考光的尺寸比、夹角以及与晶轴的对称关系都将影响晶体内形成光栅的大小和位置,并最终体现为对 1520nm ~ 1600nm 波段波长选择性上。

由布喇格衍射条件可以知道,光栅记录角度的偏离可以通过衍射光的波长偏离来弥补,因此通过对记录角度的改变就可以实现对不同通讯波长的选择。图6示出了3次以不同的物光与参考光夹角记录条件下,光栅衍射对通讯波长的选择情况。两束记录光的夹角减小时,晶体中记录的光栅间距变大,导致对通讯波段光波衍射效率最高的中心波长变长,两束记录光夹角为 65° 时对应的衍射中心波长为 1555.3nm,而 64°58' 和 63°40' 对应的衍射中心波长分别为 1557nm 和 1581.1nm。

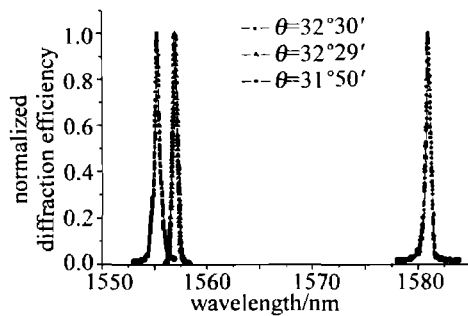


Fig. 6 The diffraction efficiencies versus different angles between object light and reference light where the angle  $\theta$  is half of the angle between object light and reference light

图7中给出了放大的利用波长为 532nm 的物光和参考光对称记录的体全息光栅的归一化衍射效率随波长的变化。由图可以看出,晶体中记录的光栅对

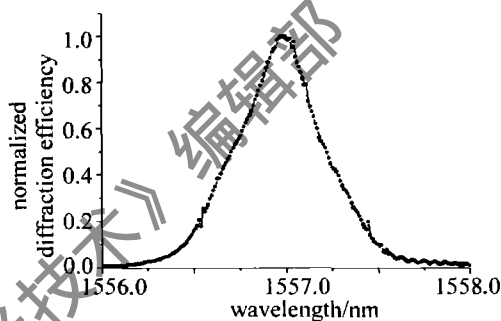


Fig. 7 The normalized diffraction efficiency versus readout wavelength when the angle between object light and reference light is 64°58'

1550nm ~ 1558nm 范围通讯波长的衍射效率差别非常大,光栅对波长在 1557nm 附近的光有最大的衍射效率,在实际应用中该波长可以作为载波的中心波长,随着波长的增加或减小,衍射效率急剧下降,分别在 1556.7nm 和 1557.2nm 处衍射效率下降为最大值的一半,对应的 3dB 带宽为 0.5nm,说明掺杂铈酸锂晶体中记录的光栅具有较好的波长选择性。

2 维耦合波理论较为准确地描述了光栅形成和衍射光波的过程<sup>[12]</sup>,给出的衍射效率见下式:

$$\eta_{\text{diff}} = \frac{\int_{-1}^0 |E_2(R_w, u_s)|^2 du_s}{\int_0^{R_w} |E_1(u_r, 0)|^2 du_r} \quad (7)$$

式中,  $E_1, E_2$  分别为读出时入射光和衍射光的电场强度,  $R_w$  为记录体光栅的尺寸比,  $u_s, u_r$  分别为垂直物光、参考光波矢方向的坐标<sup>[10]</sup>。图8是根据(7)式进行数值计算的结果与实验的比较。其中,两束记录光的夹角为 63°40', 读出光与光栅矢量夹角为 45°,  $\kappa W_s = 0.209\text{mm}, \alpha W_s = 0.12\text{mm}$ , 其中,  $\kappa$  为耦合系数,  $W_s$  为信号光宽度,  $\alpha$  是吸收系数。计算结果为衍射中心波长 1581.08nm、衍射效率下降到最大值一半时的带宽 0.53nm, 这同实验结果衍射中心波长 1581.10nm, 3dB 带宽 0.50nm 基本一致。

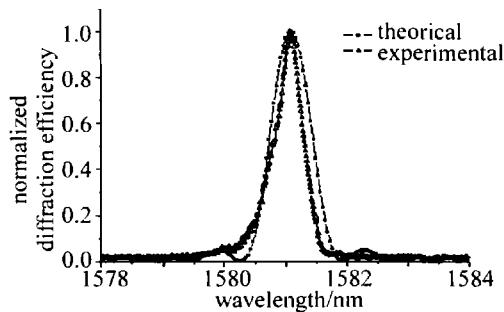


Fig. 8 The comparison between the analytical diffractive efficiency and the experimental one when the angle between object light and reference light is  $63^{\circ}40'$

#### 4 结论

采用透射式记录/正交式读出的 TWOR 方案对体光栅作为波分复用器件进行了研究。实验中采用 532nm 短波长激光在掺杂铌酸锂晶体中记录尺寸比为 1:1 的体全息光栅,用 1520nm ~ 1600nm 通讯波段激光读出,并将实验结果与理论做了比较。当两束 532nm 的记录光即物光和参考光之间的夹角为  $64^{\circ}58'$  且关于入射晶面法线对称记录光栅时,形成的体全息光栅对通讯波段的衍射中心波长为 1557nm,相应的 3dB 带宽为 0.5nm;随着两束记录光夹角的减小,形成体全息光栅的衍射中心波长增大, $65^{\circ}$  和  $63^{\circ}40'$  的记录夹角分别对应的衍射中心波长为 1555.3nm 和 1581.1nm;物光与参考光夹角为  $63^{\circ}40'$  时,实验中测得衍射中心波长为 1581.1nm,3dB 带宽 0.5nm,理论计算结果分别为 1581.08nm 和 0.53nm,实验结果同 2 维耦合波理论计算结果一致。实验和理论结果表明,短波长透射式记录的体全息光栅对正交式读出的通讯波段(1520nm ~ 1600nm)有着较好的波长选择性,采用 TWOR 方案制备波分复用器件具备可行性。不同的光栅尺寸比也会对波长选择性产生较大的影响,后续研究将会重点开

展这方面的工作。

#### 参考文献

- [1] BOFFI P, UBALDI M C, PICCININ D, *et al.* 1550nm volume holography for optical communication devices [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(10): 1355-1357.
- [2] AN J W, KIM N, LEE K W. Volume holographic wavelength demultiplexer based on rotation multiplexer in the  $90^{\circ}$  geometry [J]. Opt Commun, 2001, 197(4/6): 247-254.
- [3] NEE I, BEYER O, MÜLLER M, *et al.* Multichannel wavelength-division multiplexing with thermally fixed Bragg gratings in photorefractive lithium niobate crystal [J]. J O S A, 2003, B20(8): 1593-1602.
- [4] SATO A, SCEPANOVIC M, KOSTUK R K. Holographic edge-illuminated polymer Bragg gratings for dense wavelength division optical filters at 1550nm [J]. Appl Opt, 2003, 42(5): 778-784.
- [5] YE H, WANG H, MAO H, *et al.* Exposure characteristics of photopolymer holographic gratings [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 175-178 (in Chinese).
- [6] BREER S, BUSE K. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate [J]. Appl Phys, 1998, B66(3): 339-345.
- [7] AN J W, KIM N, LEE K W. 50GHz-spaced 42-channel demultiplexer based on the photopolymer volume grating [J]. Japan J A P, 2002, 41(6): L665-L666.
- [8] ZHONG L Y, YANG Q M, ZHANG W B. The noise and diffraction efficiency of display hologram [J]. Laser Technology, 2001, 25(4): 283-286 (in Chinese).
- [9] CHEN Sh F, WU Ch Sh, SUN Ch Ch. Design for a high dense wavelength division multiplexer based on volume holographic gratings [J]. Opt Engng, 2004, 43(9): 2028-2033.
- [10] CAO L C, MA X S, HE Q Sh, *et al.* Imaging spectral device based on multiple volume holographic gratings [J]. Opt Engng, 2004, 43(9): 2009-2016.
- [11] TAO Sh Q, WANG B, WANG D Y. TWOR scheme for holographic wavelength filters [J]. Proc SPIE, 2006, 6351: 63512W1-63512W8.
- [12] WANG B, TAO Sh Q, CHEN J B. Re-investigation on the solution to two-dimensional coupled wave equations for volume holographic gratings [J]. Chinese Journal of Laser, 2005, 32(1): 21-25 (in Chinese).

· 简 讯 ·

### 授 权 声 明

本刊已经与北京万方数据股份有限公司签署《激光技术》的数字版权独家合作协议,将 2009 年 1 月 1 日到 2012 年 12 月 31 日的上述期刊的数字版权独家授予北京万方数据股份有限公司。北京万方数据股份有限公司在 2012 年 12 月 31 日前拥有上述期刊的数字化复制权、数字化制品形式发行权、信息网络传播权、数字化汇编权及有关收益权。其他任何机构和个人未经北京万方数据股份有限公司许可使用上述期刊或文献数据进行赢利性活动,均为非法。本刊已授权北京万方数据股份有限公司以其名义进行维权。特此声明!

《激光技术》编辑部