

变波长读出条件下光折变局域体全息 光栅的衍射性质*

胡志娟 闫爱民 刘德安 王春花 刘立人

(中科院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要 利用二维耦合波理论,研究了用短波长记录全息光栅而用通讯波段内的长波长读出时,用于 90° 结构垂直读出平板型的光折变局域体全息光栅的衍射性质. 讨论了局域体全息光栅的几何尺寸对其衍射效率及光栅布喇格选择性的影响. 结果表明,随着光栅的纵向和横向尺寸的增加,光栅的衍射效率也逐渐增加. 当光栅的纵向和横向尺寸发生改变但光栅的总面积不变时,光栅衍射效率保持不变. 此外,随着光栅尺寸的增加光栅的布喇格选择性越好. 在利用短波长记录全息光栅而用长波长读出的光学器件设计过程中,为了获得最佳的衍射效率及其布喇格选择特性,应当根据要求合理地设计光栅的几何尺寸.

关键词 衍射光学;局域体全息光栅;耦合波理论;衍射效率

中图分类号 O438 **文献标识码** A

0 引言

波分复用全光通信网有望成为解决超大容量和超高速率通信系统的有效手段,近年来一直是国内外研究的热点. 光折变体全息光栅由于具有角度和波长选择性好、衍射效率高、对机械震动和温度变化不敏感等诸多优点^[1~3],成为应用于波分复用器件(WDM)设计中最有应用前景的技术之一^[4].

光折变体全息光栅应用于通信领域时,由于光折变晶体对通信波段的长波长的吸收非常微小,因此难以实现用通讯波段内波长来记录光折变全息光栅. 此时全息光栅通常用短波长的光束记录,而用长波长的光束读出,这种方法称为两波长方法^[5]. 它比全息的同波长再现有许多优点,如可以使得信息再现时减少对光栅的擦除,提高体光栅的衍射效率,在实验室条件下方便地记录体全息等. Buse^[4]等人以光折变 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体为记录材料从理论和实验上论证了用短波长的双绿光束干涉记录多重体全息光栅,再用长波长的通信波段光波(波长约 1550 nm)的读出,设计了基于光折变体全息 WDM 器件. 随后,Boffi^[6]等人也用两波长方法设计了基于体全息光栅的全光型的光通信 WDM 器件,并给出了实验验证. 他们对由光折变晶体制作的 WDM 器件的体全息光栅衍射性质如衍射效率的分析,采用的都是 Kogelnik 的一维耦合波理论^[7],没有考虑光栅的纵向尺寸和边界效应. 在许

多实际应用中,光栅尺寸趋向于小型化, Kogelnik 理论中体光栅的入射和出射边界为无限大的模型不再适用于局域(或有限尺寸)体全息光栅.

本文利用二维耦合波理论^[8]研究了记录和读出波长不同的情况下,用于 90° 结构垂直读出平板型的光折变局域体全息光栅的衍射性质. 分析了局域体全息光栅的几何尺寸对其衍射效率及光栅布喇格选择性的影响. 该垂直读出的平板光学元件可以应用于多重体全息光栅制作 WDM 光通信器件、波导耦合器件等.

1 基本原理和结构设计

光学技术的进一步应用取决于光学器件与系统的集成化技术的发展,小型化和全光化是光学器件和系统的发展方向. 光折变体全息光栅的 90° 记录和读出结构具有很高的角度选择性,并对光折变全息记录材料的光致散射和扇形效应不敏感^[9],同时具备了可以在三维空间任意改变光束的传输方向这一优点. 因而非常有利于实现集成光学器件的小型化及高衍射效率器件的设计^[10]. 鉴于此,文中将研究的变波长读出的局域全息光栅具有 90° 读出结构.

1.1 变波长读出时的布喇格匹配

在体全息光栅的读出过程中,当读出光波的波长发生很大改变时,由读出波长改变引起的布喇格偏移可以通过改变读出角的大小而加以补偿. 可以由布喇格匹配条件求出读出角与写入角之间的关系. 图 1 是不同波长的记录光束和读出光束的波矢匹配图. 图中 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ 是波长为 λ_1 的两束平面记录光束的波矢,分别以角度 θ_{10} 和 θ_{20} 投射到光折变晶体中形成光栅波矢为 \mathbf{K} 全息光栅. 而用波长为 λ_2 的光

*国家自然科学基金(60177106)和国家科学技术部基金(2002CCA03500)资助

Tel: 021-69918762 Email: zhijuan-hu@mail.siom.ac.cn

收稿日期: 2005-09-04

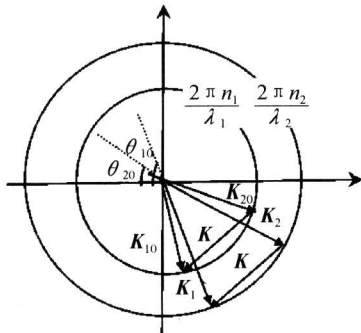


图1 不同波长记录和读出全息时的波矢匹配图
Fig.1 Wave-vector matching diagram for different recording and readout beam

波读出时,要满足 Bragg 衍射匹配条件就必须改变入射角的方向,读出光束的读出角为 θ_1 ,衍射光束的出射角为 θ_2 ,图中 K_{10}, K_{20} 分别为波长为 λ_2 的读出光束和衍射光束的波矢量. 根据布喇格衍射条件有

$$\cos(\phi - \theta_{10}) = K/2\beta \quad (1)$$

式中 $\phi = \arctan \frac{\cos \theta_{10} - \cos \theta_{20}}{\sin \theta_{10} - \sin \theta_{20}}$ 为光栅波矢的方位角, $K = \frac{4\pi n_1}{\lambda_1} \sin \frac{|\theta_{10} - \theta_{20}|}{2}$ 为光栅波矢大小, $\beta =$

$\frac{2\pi n_1}{\lambda_1}$ 为传播常量. 如果读出光束也满足 Bragg 匹配条件,则应满足

$$\frac{n_1 \cos(\phi - \theta_{10})}{\lambda_1} = \frac{n_2 \cos(\phi - \theta_1)}{\lambda_2} \quad (2)$$

此外,由波矢匹配图 1 中的几何关系,可以得到记录两光束间的夹角与读出和衍射光束之间夹角关系式

$$\frac{n_1}{\lambda_1} \sin \frac{\theta_{10} - \theta_{20}}{2} = \frac{n_2}{\lambda_2} \sin \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (3)$$

于是由式(1)~(3)可以求出两平面波干涉形成全息光栅在改变读出光波波长情况下的读出角 θ_1 与衍射角 θ_2 的大小.

1.2 结构设计

本文用 632.8 nm 的短波长记录光束 R_1, S_1 干涉形成局域体全息光栅,并希望在读出时,用波长为 1550 nm 的光束 R_2 沿负 Y 轴方向读出,在其垂直方向得到沿 X 轴方向的衍射光束 S_2 ,实现用短波长记录长波长的 90° 结构垂直转换读出. 当读出光波波长发生改变,可以通过改变读出光束入射角的方向来满足 Bragg 衍射的匹配条件. 根据前面的式(1)~(3)可以求得用 1550 nm 波长读出得到垂直衍射光时,波长为 632.8 nm 的记录光的记录内角度应分别为 $\theta_{10} = 61.2131^\circ$ 和 $\theta_{20} = 28.7869^\circ$. 平板型局域体全息光栅变波长条件下的记录和读出结构如图 2,全息光栅的纵向尺寸大小为 W_S ,横向尺寸大小为 W_R ,在 z 轴方向的厚度应满足远大于入射光波的波长.

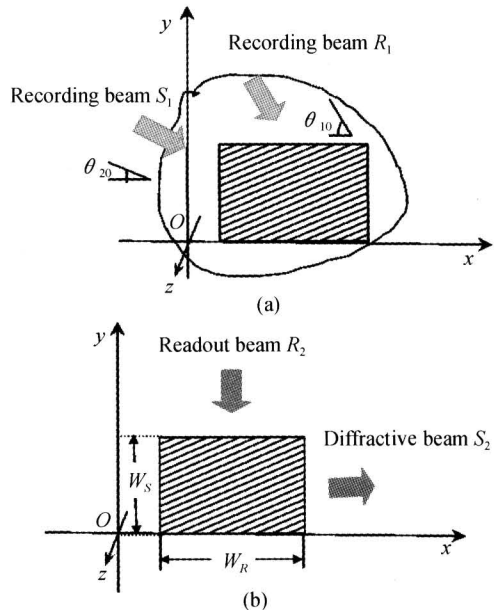


图2 平板型局域体全息光栅变波长读出条件下的记录结构(a)和 90° 读出结构(b)

Fig.2 Geometry of forming (a) and reconstruction (b) local volume holographic grating at different wavelength

2 耦合波理论分析

假设在双掺杂的铌酸锂光折变材料内记录一个有限宽度平面波干涉产生的体光栅,如图 2. 光栅记录时参考光束和物光束分别记为 R_1 和 S_1 ,电场的振动方向垂直于入射面,电场分布写为

$$E_{R1} = R_1(x, y) \exp(-\gamma_1 p_{10}) \quad (4)$$

$$E_{S1} = S_1(x, y) \exp(-\gamma_1 p_{20}) \quad (5)$$

式中 R_1, S_1 为两光束相对电场振幅的大小; $\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1$, α_1 和 $\beta_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda_1}$ 分别为记录阶段的吸收系数和传播常量,这里的 λ_1 取为 632.8 nm; $p_{10} = \cos \theta_{10} x - \sin \theta_{10} y$, $p_{20} = \cos \theta_{20} x - \sin \theta_{20} y$ 分别为两记录光束的位相函数. 在线性记录条件下,记录介质介电常量调制正比于光栅内部总电场的平方,介质的相对介电常量可以写为

$$\epsilon_r = \epsilon_{r0} + \epsilon_{r1} \cos[\beta_0(p_{10} - p_{20})] \quad (6)$$

式中 ϵ_{r0} 为平均介电常量, $\epsilon_{r1} = 2kR_1 S_1$, k 是比例常量. 在全息重现时用波长为 1550 nm 的光束 R_2 沿负 y 轴方向读出,设再现光和衍射光的复振幅为 R 和 S ,由于双掺杂的铌酸锂光折变材料对通信波段(波长在 1550 nm 附近)没有吸收和光折变效应^[4],光栅内的总电场强度为

$$E = R(x, y) \exp(-j\beta_2 p_1) + S(x, y) \cdot \exp(-j\beta_2 p_2) \quad (7)$$

式中, $p_1 = -y$, $p_2 = x$ 分别为读出光束和衍射光束的相位函数. 将式(7)代入标量波动方程 $\nabla^2 E + \omega^2 \mu \epsilon_0 \epsilon_r E = 0$ 中,并且假设再现光和衍射光的振幅是缓慢变化的,忽略它们的二阶偏导数,只保留 0 级和

一级布喇格衍射,可以得到两平面光束形成的全息光栅的耦合波方程

$$\nabla p_1 \cdot \nabla R + i\kappa \exp(-iM)S = 0 \quad (8)$$

$$\nabla p_2 \cdot \nabla S + i\kappa \exp(iM)R = 0 \quad (9)$$

式中

$$\kappa = \frac{\pi n_1}{\lambda_1},$$

$$M = \beta_1(p_{10} - p_{20}) - \beta_2(p_1 - p_2) \quad (10)$$

M 为布喇格偏移因子,考虑布喇格失配因子 M 的影响,设 1550 nm 的平行光束读出全息时的读出方向与负 Y 轴发生 $\delta\theta$ 的微小偏移. 此时读出光束的相位函数可以表示为

$$p'_1 = -y \cos \delta\theta - x \sin \delta\theta \quad (11)$$

假设 $\delta\theta$ 非常微小,那么近似有: $p'_1 \approx -y - x\delta\theta$. 将 p_{10} 、 p_{20} 、 p'_1 和 p_2 代入式(10)中,可以得到

$$M = [\beta_1(\cos \theta_{10} - \cos \theta_{20}) - \beta_2(-\delta\theta - 1)]x - [\beta_1(\sin \theta_{10} - \sin \theta_{20}) - \beta_2]y \approx \beta_2 \delta\theta x \quad (12)$$

此时耦合波方程可写为

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial y} - j\kappa \exp(-j\beta_2 \delta\theta x)S = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial x} + j\kappa \exp(j\beta_2 \delta\theta x)R = 0 \end{cases} \quad (13)$$

相应的边界条件为

$$R=1, \text{ 在 } y=W_S, x_0 < x < x_1 \text{ 上} \quad (14)$$

$$S=1, \text{ 在 } x=x_0, 0 < y < W_S \text{ 上} \quad (15)$$

方程式(13)和(14)、(15)分别是关于衍射光和透射光振幅的拉普拉斯双曲线方程组及其边界条件,利用黎曼方法^[10]进行求解,可以得到局域体光栅的衍射光和透射振幅的表达式

$$S(x, y) = -jk \int_{x_0}^x \exp(i\delta\theta\beta_2\tau) J_0 \cdot (2\kappa \sqrt{(x-\tau)(y-y_0)}) d\tau \quad (16)$$

$$R(x, y) = 1 + k \exp(i\delta\theta\beta_2 x) \int_{x_0}^x \exp(i\delta\theta\beta_2\tau) \cdot \sqrt{\frac{x-\tau}{y-y_0}} J_1(2\kappa \sqrt{(x-\tau)(y-y_0)}) d\tau \quad (17)$$

求得透射振幅和衍射振幅后,可以根据式(18)计算整个全息光栅的衍射效率

$$\eta_{\text{diff}} = \frac{\int |S(x_0 + w_R, y)|^2 dy}{\int |R(x, w_S)|^2 dx} \quad (18)$$

3 数值结果与讨论

当布喇格偏移 $M=0$ 时,利用式(16)、(17)和(18)可以到光栅的衍射效率为

$$\eta_{\text{DE}} = 1 - \frac{J_0^2(2\kappa \sqrt{(x-x_0)y})}{J_1^2(2\kappa \sqrt{(x-x_0)y})} \quad (19)$$

图 3 给出了不同尺寸的全息光栅衍射效率沿光栅厚度的关系图. 其中 $n_1 = 5 \times 10^{-5}$, 从图中可以看出光栅的衍射效率随着光栅厚度的增加而增大,

并逐步趋于平缓后达到一定的值,而不会出现一维理论^[7]预期的透射型光栅衍射效率随光栅厚度变化而周期变化的情况. 因此,对改变波长读出情况下光折变晶体局域体全息光栅的衍射效率的分析,不能简单采用 Kogelnik 的一维耦合波理论,应当考虑光栅的纵向尺寸和边界效应. 图中不同的曲线代表不同的光栅尺寸($W_R \times W_S$),随着光栅尺寸的增加,光栅的衍射效率也逐步增加. 但是还可以从式(19)中看出,当光栅保持耦合系数 κ 不变时,如果光栅的面积 $W_R \times W_S$ 保持不变,那么光栅的衍射效率也将保持不变,即改变长方晶体的形状,但保持面积不变,光栅的衍射效率也将不变.

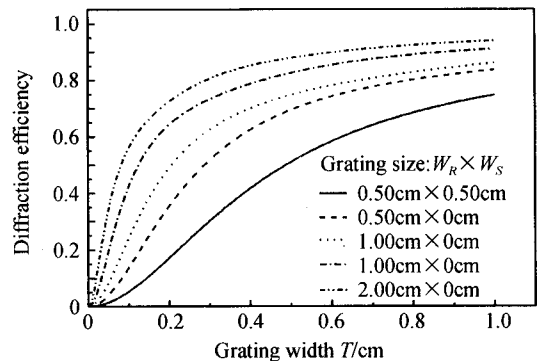


图 3 光栅衍射效率与光栅厚度的关系图

Fig. 3 The diffraction efficiency of the grating as functions of the width W_R of the grating for different grating size

在改变读出波长的情况下重现全息光栅时,光栅的布喇格选择性也受到光栅尺寸的影响. 图 4 给出了光栅归一化衍射效率随偏移角 $\delta\theta$ 的变化曲线图,当偏移角 $\delta\theta$ 增大时衍射效率迅速降低,与文献[11]中两平面光波干涉形成透射型光栅的布喇格选择角度相对比,可以看出 90° 垂直方向读出光折变局域全息光栅具有更好的角度选择性. 图中曲线 a 代表的光栅尺寸为 $1.00 \text{ cm} \times 1.00 \text{ cm}$, 曲线 b 代表的光栅尺寸为 $2.00 \text{ cm} \times 2.00 \text{ cm}$, 比较两曲线可以看出光栅的尺寸大小对光栅的布喇格选择也有影响,光栅尺寸越大光栅的布喇格选择性越好.

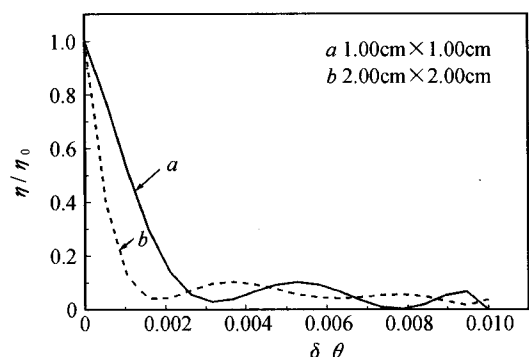


图 4 归一化衍射效率随偏移角 $\delta\theta$ 的变化曲线图

Fig. 4 Diffraction efficiencies (normalized to their values when $\delta\theta=0$) versus $\delta\theta$

4 结论

本文利用二维耦合波理论,研究了用 632.8 nm 的平面光束记录全息光栅,而用通讯波段 1550 nm 光束读出此全息情况下,用于 90°结构垂直读出平板型的光折变局域体全息光栅的衍射特性. 分析了局域体全息光栅的几何尺寸对其衍射效率及光栅布喇格选择性的影响. 研究表明,随着光栅的纵向和横向尺寸的增加,光栅的衍射效率也逐渐增加. 当光栅的纵向和横向尺寸发生改变但光栅的总面积不变时,光栅衍射效率将保持不变. 光栅的布喇格选择特性随着光栅尺寸的增加有所提高. 该垂直读出的平板光学元件可以记录多重体全息光栅制作 WDM 光通信器件、波导耦合器件等,在利用短波长记录全息光栅长波长读出全息器件的设计过程中,为了获得最优的衍射效率及其布喇格选择特性,应当根据要求合理地设计光栅的几何尺寸.

参考文献

- 1 Buse K, Adibi A, Psaltis D, *et al.* Nonvolatile holographic storage holograms in doubly doped lithium niobate crystals. *Nature*, 1998, **393**(7): 665~668
- 2 谢敬辉,张泽明,周元林,等. Fe: LiNbO₃ 全息图热定影及 H⁺浓度的影响. 光子学报, 2003, **32**(3): 344~347
Xie J H, Zhang Z M, Zhou Y L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 344~347
- 3 郑威,周玉祥,刘彩霞. Ce: Co: LiNbO₃ 晶体光折变性

能研究. 光子学报, 2003, **32**(12): 1492~1494

Zheng W, Zhou Y X, Liu C X. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1492~1494

- 4 Breer S, Buse K. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate. *Appl Phys B*, 1998, **66**(2): 339~345
- 5 Barbastathis G, Psaltis D. Shift-multiplexed holographic memory using the two-lambda method. *Opt Lett*, 1996, **21**(6): 432~434
- 6 Boffi P, Ubaldi M C, Piccinin D, *et al.* 1550 nm volume holography for optical communication devices. *IEEE Photon Tech Lett*, 2000, **12**(10): 1355~1357
- 7 Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Bell Syst Tech J*, 1969, **48**(9): 2909~2947
- 8 Tao S, Wang B, Burr G W, *et al.* Diffraction efficiency of volume grating with finite size: corrected analytical solution. *J Mod Opt*, 2004, **51**(8): 1115~1122
- 9 An J W, Kim N, Lee K W. Volume holographic wavelength demultiplexer based on rotation multiplexing in the 90° geometry. *Opt Commu*, 2001, **197**(2): 247~254
- 10 闫爱民,刘立人,刘德安. 体全息光栅透镜的设计和应用. 光子学报, 2005, **34**(2): 280~283
Yan A M, Liu L R, Liu D A. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 280~283
- 11 陶世荃,王大勇,江竹青,等. 光全息存储. 北京: 北京工业大学出版社, 1998. 12. 66~71
Tao S Q, Wan D Y, Jiang Z Q, *et al.* Optical holographic storage. Beijing: Beijing University of Technology Publishers, 1998. 12. 66~71

The Diffraction Properties of Finite Size Volume Holographic Gratings at Different Readout Wavelength

Hu Zhijuan, Yan Aimin, Liu Dean, Wang Chunhua, Liu Liren

Information laboratory of Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2005-09-04

Abstract Using the two-dimensional coupled-wave theory, the diffraction properties of the 90-degree readout geometry of the finite size planar holographic grating which recorded by short-wavelength, but reconstructed by telecommunication long-wavelength were investigated. The effects of the grating geometrical size to the diffraction efficiency and to the Bragg selectivity of the grating were studied. It was shown that, as the horizontal direction and vertical direction sizes of the grating increase, the diffraction efficiency of holographic grating increased. When the horizontal and vertical direction sizes were changed while their products contain constant, the diffraction efficiency contain constant. The Bragg selectivity increased with the geometrical size of the grating increasing.

Keywords Diffraction optics; Finite size volume holographic grating; Coupled wave theory; Diffraction efficiency



Hu Zhijuan was born on Oct. 1, 1978. She got her M. S. degree from Sichuan Normal University in 2003. Now she is studying for her Ph. D. in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her research interests focus on diffraction optics and optical information processing.