

记录结构对体光栅各向异性衍射选择特性研究*

王欣 刘德安 闫爱民 胡志娟 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要 以静态体光栅各向异性衍射理论分析模型为基础, 将与体光栅厚度有关的记录光强调制度引入到各向异性耦合波方程中. 利用耦合波理论分析了光折变晶体中体光栅的各向异性衍射性能, 研究了在不同初始记录光强比的条件下, 记录光入射角的改变对光折变体光栅各向异性布喇格衍射性能的影响. 结果表明: 记录光入射角和记录光初始光强比均对体光栅的各向异性衍射具有选择性; 与此相比, 记录光入射角和记录光初始光强比对于体光栅各向同性衍射不具备选择性.

关键词 信息光学; 各向异性衍射; 体光栅; 衍射效率

中图分类号 O438 **文献标识码** A

0 引言

光折变材料中的体光栅在光信息处理、光束偏转和扫描、光计算等方面有重要应用^[1,2]. 由于许多用于记录体光栅的材料具有双折射各向异性, 因此对各向异性介质中体光栅衍射性能的研究已经引起了广泛关注^[3~5]. 文献[3]将记录光强引入到耦合波方程来研究体光栅的衍射问题, 但并没有讨论记录光强改变对其衍射性能的影响. 国内研究人员^[4]把光强调制度引入到双光束耦合波方程, 分析了初始光强对衍射性能的影响, 但并没有涉及体光栅各向异性衍射的问题. 随着实际应用的深入进展, 体光栅各向异性衍射的研究和应用也日趋重要, 如利用各向异性布喇格衍射设计各向异性光折变光开关^[5], 也可以用来大幅度提高光信息处理中的信噪比.

本文在静态体光栅各向异性衍射分析的基础上^[3,5], 将与体光栅厚度有关的记录光强调制度引入到耦合波方程, 研究晶体中光折变体光栅的布喇格衍射性能. 主要目的是分析在不同记录光初始光强比的条件下, 记录光入射角改变对体光栅各向异性布喇格衍射效率的影响, 并将结果与各向同性衍射进行比较. 分析结果对提高晶体中光折变体光栅在光信息存储、光互连等光信息处理领域的应用具有重要意义.

1 理论分析

为讨论方便, 本文的分析只涉及透射型光折变体光栅. 晶体中光折变体光栅的记录结构如图 1. 光折变晶体的光轴(\hat{c} 轴)垂直于入射面, 两束偏振

状态相同的平面波对称入射到晶体上, 并在晶体内发生干涉. 基于光折变效应, 形成光栅波矢为 $\mathbf{K}_g = \mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2$ 的折射率光栅, 其中 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ 分别表示两束记录光波 1 和 2 的波矢, \mathbf{K}_g 平行于 y 轴, $|\mathbf{K}_g| = 2\sin\theta|\mathbf{K}_1|$, θ 为记录光束晶体入射角的大小, d 为晶体厚度.

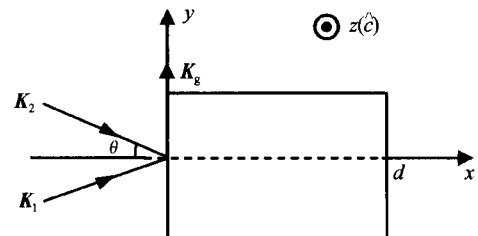


图 1 体光栅记录结构
Fig. 1 The recording geometry of the volume grating

记录结束后, 用一束平面读出光对体光栅进行读出. \mathbf{K}_r 和 \mathbf{K}_s 分别为满足布喇格条件的读出光与衍射光波矢量, θ_r 和 θ_s 分别为这两束光波在晶体内的读出角和衍射角. 读出光和衍射光的电场分别为

$$\begin{aligned} E_r(\mathbf{r}) &= \hat{e}_r R \exp(i\mathbf{K}_r \cdot \mathbf{r}) \\ E_s(\mathbf{r}) &= \hat{e}_s S \exp(i\mathbf{K}_s \cdot \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (1)$$

\hat{e}_r 和 \hat{e}_s , R 和 S 分别为读出光和衍射光的单位偏振矢量和波振幅.

无外加电场, 并忽略介质的吸收效应, 取空间慢变化近似^[6], 得到晶体内读出光与衍射光波振幅耦合方程^[3]

$$\begin{aligned} \cos\theta_r \frac{dR}{dx} &= \kappa_r m(x) S \\ \cos\theta_s \frac{dS}{dx} &= -\kappa_s m(x) R \end{aligned} \quad (2)$$

式中, 耦合系数 κ_r 和 κ_s 由下式可表示为

$$\begin{aligned} \kappa_r &= \frac{\pi\chi_{\text{eff}}}{2n_r\lambda_0 \cos\theta_r} \\ \kappa_s &= \frac{\pi\chi_{\text{eff}}}{2n_s\lambda_0 \cos\theta_s} \end{aligned} \quad (3)$$

式中

*国家自然科学基金(60177106)和国家科学技术部(2002CCA03500)课题资助项目
Tel: 021-69918762 Email: wangxin@mail.siom.ac.cn
收稿日期: 2005-04-11

$$\chi_{\text{eff}} = (\hat{e}_1 \cdot \hat{e}_2)(\hat{e}_r \cdot \delta \hat{x} \cdot \hat{e}_s)$$

$$\delta \hat{x} = -\tilde{\epsilon} \cdot \tilde{\gamma} \cdot \mathbf{E}_{\text{sc}} \cdot \tilde{\epsilon}$$

式中, λ_0 是记录光波真空中波长, n_r 和 n_s 分别为读出光和衍射光对应的晶体折射率, χ_{eff} 为有效极化率, $\tilde{\gamma}$ 是三阶电光张量, $\tilde{\epsilon}$ 是晶体二阶介电张量, \mathbf{E}_{sc} 是空间电荷场. \hat{e}_1 和 \hat{e}_2 分别表示两束记录光波 1 和 2 的单位偏振矢量. $m(x)$ 为晶体内记录光光强调制度.

参照文献[7], 定义函数: $u(x) = \int_0^x m(x) dx$ 对式(2)进行简化. 然后给定边界条件: $R(0) = 1, S(0) = 0$ 求解方程. 定义体光栅衍射效率为沿出射面法向的衍射光波能量与沿入射面法向的读出光波能量之比, 于是得到衍射效率

$$\eta = \sin^2 [|\kappa_r \kappa_s|^{1/2} u(d)] \quad (4)$$

式中

$$u(d) = 4\Gamma^{-1} \sqrt{m_0} (\arctan \sqrt{m_0} e^{\Gamma d} - \arctan \sqrt{m_0})$$

式中, $\Gamma = 2\pi n_1 / \lambda_0 \cos \theta$ 为记录光强耦合系数[5], n_1 为折射率调制振幅, m_0 为两束记录光初始强度 I_{20} 和 I_{10} 比值.

2 计算结果与讨论

本文给出记录在铌酸锂 (LiNbO_3) 晶体中体光栅衍射效率的计算结果. 对于真空波长为 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ 的寻常光和非常光, LiNbO_3 晶体的折射率分别为:

$n_o = 2.2910, n_e = 2.2005$; 非零电光张量元分别为: $r_{22} = 3.4 \times 10^{-12} \text{ m/V}, r_{13} = 8.6 \times 10^{-12} \text{ m/V}, r_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}, r_{31} = 28.0 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ [8].

图 2 为在不同初始记录光强比的条件下, 体光栅衍射效率随记录光入射角变化曲线. 其中, oo 衍射表示读出光和衍射光均为 o 光, 是各向同性衍射. 读出光和衍射光分别为 o 光和 e 光的 oe 衍射, 读出光和衍射光分别为 e 光和 o 光的 eo 衍射, 后两种衍射类型为各向异性衍射[9]. 从图 2(a) 可以看出, 当 $m_0 = 0.1$ 时, oe 衍射的衍射效率随记录光入射角的增大从接近零值逐渐增大至 100% 然后又逐渐减小; 当 m_0 分别取 0.2、0.3 和 0.4 时, 衍射效率随着记录角的增大先减小至零, 然后逐渐增大到 100%, 之后逐渐减小. 图 2(b) 显示, 当 m_0 在 0.5~0.8 之间增大时, oe 衍射的衍射效率随着记录光入射角的增大先减小至零值, 然后增大, 当记录角为 25° 时, 其衍射效率均达到 100%. 比较图 2(a)、(b)、(c) 和 (d) 可知, 当 m_0 取相同的值时, 各向异性 oe 衍射和 eo 衍射的衍射效率随记录光入射角变化趋势基本一致. eo 衍射的衍射效率的最大值和最小值与 oe 衍射的位置不同. 当记录角较小时, eo 衍射的衍射效率较大. 由此可以得出结论: 记录光初始光强比和记录角度对体光栅各向异性衍射效率具有选择性.

图 2(e) 和 (f) 表明, 当 m_0 在 0.1~0.8 之间取值时, 体光栅各向同性衍射效率均随着记录角的增

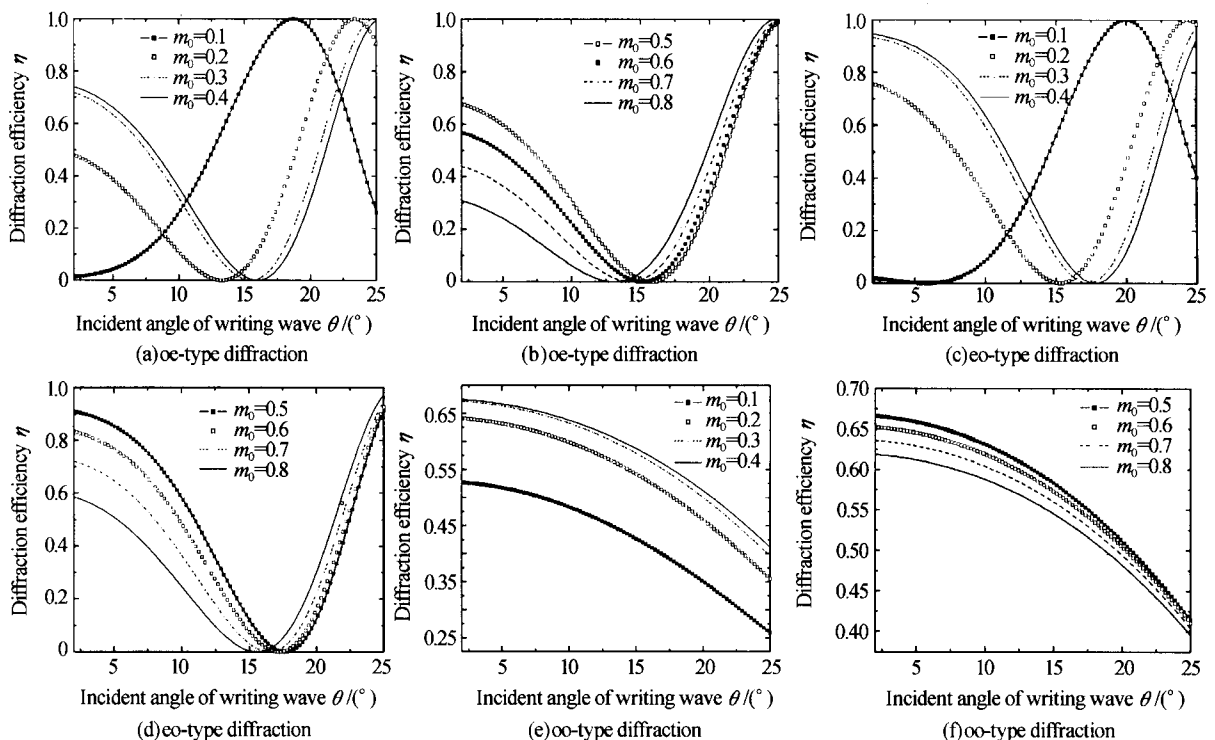


图 2 LiNbO_3 晶体中体光栅的衍射效率曲线

Fig. 2 Diffraction efficiency of the volume grating in LiNbO_3 ($m_0 = I_{20}/I_{10}$)

大而减小,与各向异性衍射相比较,记录条件对其影响不具有选择性,此外各向同性衍射效率最大值较低只有 67%。这是因为当光轴与记录光入射面垂直,光栅波矢方向沿着 y 方向时,oo 衍射的有效极化率只与光张量元 r_{22} 相关,而各向异性衍射的有效极化率仅与光张量元 r_{51} 相关, r_{22} 相对 r_{51} 其值较小,导致各向异性衍射的耦合系数 κ_r 和 κ_s 较大。

综上所述,由于记录光初始光强比和记录角度对体光栅各向异性衍射效率具有选择性,因此利用晶体中光折变体光栅的各向异性衍射,选取合适的初始记录光强比和记录角可以获得较高的衍射效率。此外,由于读出光和衍射光偏振方向正交,可以改善信噪比,在实际应用中,利用晶体中光折变体光栅各向异性衍射来实现信号处理将更有意义。

3 结论

本文基于耦合波理论分析了光折变晶体中的体光栅各向异性衍射性能。研究了不同记录光初始光强比的情况下,记录光入射角变化对光折变晶体中体光栅各向异性衍射效率的影响,并将其与各向同性衍射作比较。结果表明,不但记录角对体光栅各向异性衍射具有一定的选择性,而且记录光初始光强比也对体光栅各向异性衍射具备明显的选择性,而该记录结构对各向同性衍射不具有选择性。分析结果为光折变晶体中体光栅的实际应用提供了理论根据。

The Selectivity of Recording Condition on The Anisotropic Diffraction of Volume Gratings: Investigation

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

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800

Received date: 2005-04-11

Abstract Based on the model of anisotropic coupling theory, the initial intensity ratio of the two recording waves which was coherent to the length of the grating was introduced to the anisotropic coupling equations. The anisotropic Bragg diffraction properties of volume gratings in photorefractive crystals were investigated by the method of the couple wave theory. The effect both of the initial ratio of the intensity and of the recording angles of writing waves on the anisotropic Bragg diffraction properties of volume gratings was discussed. It is shown that both the ratio of the initial intensity and the incident angle of the writing waves were selective for the anisotropic Bragg diffraction efficiency of the volume gratings, while these two recording conditions were not selective for the isotropic Bragg diffraction.

Keywords Information optical; Anisotropic diffraction; Volume gratings; Diffraction efficiency



Wang Xin was born in 1978 in Henan Province, China. She received the B. S. degree in physics from Henan Normal University, and the M. S. degree from Huazhong University of Science and Technology. Now she is studying for her Ph. D. degree in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics of CAS. Her research interests are optical holography and photorefractive optics.

参考文献

- 1 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
- 2 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 Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1492~1494
- 3 Temple D A, Warde C. Anisotropic scattering in photorefractive crystals. *J Opt Soc Am B*, 1986, **3**(2): 337~341
- 4 刘宏利,王肇圻,张铁楠,等. 偏振控制的 Ce : KNSBN 类光纤光折变光开关. 光子学报, 2004, **33**(3): 277~280
Liu H L, Wang Z Q, Zhang Y N, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 277~280
- 5 阎晓娜,刘立人. 各向异性光折变开关的原理. 光学学报, 2001, **21**(10): 1249~1252
Yan X N, Liu L R. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1249~1252
- 6 Yariv A, Yeh P. *Optical Waves in Crystals*. New York: Wiley, 1984. 177~185
- 7 Kenan R P. Theory of crossed-beam diffraction gratings. *IEEE J Quantum Electron*, 1979, **QE-14**(12): 924~930
- 8 Weis R S, Gaylord T K. Lithium niobate: summary of physical properties and crystal structure. *Appl Phys A*, 1985, **37**: 191~203
- 9 Glytsis E N, Gaylord T K. Three-dimensional (vector) rigorous coupled-wave analysis of anisotropic grating diffraction. *J Opt Soc Am A*, 1990, **7**(8): 1399~1420