

偏振控制的 Ce:KNSBN 类光纤光折变光开关*

刘宏利¹ 王肇圻¹ 张轶楠¹ 胡平¹ 高卫华¹ 韩德万²

(1 南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

2 延边大学理工学院物理系, 吉林 133002)

摘要 在 Ce:KNSBN 光折变类光纤晶体中, 用不同偏振的读出光控制衍射光强的大小从而实现光折变光开关的开-关功能. 实验结果表明 e 光读出时的光栅衍射效率是 o 光读出的 310 倍, 而且衍射效率比不随写入光光强比的变化而变化. 与块状晶体做了比较, 并用理论进行了分析, 在光折变类光纤中的衍射效率比是块状晶体的 10 倍, 光折变类光纤晶体有着更好的光开关性能.

关键词 光折变类光纤; 衍射效率; 光开关

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

光折变光开关因为同时具有高带宽、无串扰等特点和光折变所特有的高衍射效率、快响应等优点, 近年来吸引了广大研究者的注意, 已先后有电控制、位相控制、光扇控制等多种光折变光开关方案提出^[1-4]. 偏振控制的光折变开关是基于光折变全息光栅的衍射效率对记录和读出光束偏振方向的依赖关系, 对记录于光折变晶体中的全息光栅分别用两种正交偏振的读出光读出, 如果在这两种情况下衍射效率相差很大, 则通常的时开-时关功能就可以实现.

光折变类光纤在光学信息处理方面有着独特的应用, 多个类光纤晶体可以排成光纤阵列的形式进行数据存储, 并且可以对单个类光纤晶体进行调制, 更重要的是它便于和光学光纤相耦合完成光纤通信中诸如相位共轭的任务. 本文讨论了在 Ce:KNSBN 类光纤晶体中以读出光偏振态控制体光栅衍射效率大小从而实现光的开-关选通操作的基本原理, 并与块状晶体做了比较, 发现光折变类光纤中的衍射效率比是块状晶体中的 10 倍. 而且光折变开关的响应速度非常快, 可为毫秒的量级, 在光互连方面有着很好的应用.

1 基本原理

根据 Kogelnik 耦合波理论, 假设晶体中的耦合为弱耦合, 可以得到光栅的衍射效率公式为^[5]

$$\eta = \left[\frac{\pi L}{2n_1 \lambda} \chi_{\text{eff}} \right]^2 \quad (1)$$

式中 n_1 为读出光在晶体中的折射率, L 为晶体的有

效厚度, χ_{eff} 为有效极化率, 其计算公式为

$$\chi_{\text{eff}} = (e_1 e_2) (e_4 \delta x e_3) \quad (2)$$

式中 δx 是由空间电荷场 E_{sc} 引起的介电张量变化, 即

$$\delta x = -\epsilon \gamma E_{\text{sc}} \epsilon \quad (3)$$

e_1 和 e_2 分别为信号光和参考光的单位偏振矢量, e_3 和 e_4 分别为读出光和衍射光的单位偏振矢量, ϵ 为二阶光学介电张量, γ 为三阶电光张量, E_{sc} 为光感应空间电荷场, 由记录光束的波长和夹角决定, 是与记录光束的偏振无关的量. 如果信号光 I_1 和参考光 I_2 对称入射, 与晶体表面法线的夹角为 θ , 则光栅矢量 K 平行于晶体的 C 轴, Ce:KNSBN 晶体属于 4 mm 点群, 在不加外电场时, δx 具有如下形式

$$\delta x = \begin{bmatrix} \gamma_{13} E_{\text{sc}} n_o^4 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{13} E_{\text{sc}} n_o^4 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{33} E_{\text{sc}} n_e^4 \end{bmatrix}$$

如果写入光 I_1 和 I_2 为 e 光, 则 $e_1 = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ 0 \\ \cos \theta \end{bmatrix}$, $e_2 =$

$\begin{bmatrix} -\sin \theta \\ 0 \\ \cos \theta \end{bmatrix}$, 当读出光也为 e 光时, 衍射效率为

$$\eta_e = \left[\frac{\pi L}{2n_e \lambda} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) (n_e^4 \cos^2 \theta \gamma_{33} E_{\text{sc}} - n_o^4 \sin^2 \theta \gamma_{13} E_{\text{sc}}) \right]^2 \quad (4)$$

当读出光为 o 光时, 衍射效率为

$$\eta_o = \left[\frac{\pi L}{2n_o \lambda} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) n_o^4 \gamma_{13} E_{\text{sc}} \right]^2 \quad (5)$$

在这里, 读出光均以布喇格角读出, e 光和 o 光读出的布喇格角分别为^[6]

$$\theta_e = \theta; \theta_o = \arcsin (n_e \sin \theta / n_o) \quad (6)$$

利用式(4)和式(5), 得出 e 光读出时的衍射效率与 o 光读出时的衍射效率之比为

*国家自然科学基金资助项目(批准号:60177006)

Tel:022-23508332 Email:liuhl2eyou.com

收稿日期:2003-04-21

$$\beta = \frac{\eta_e}{\eta_o} = \left[\frac{(n_o^4 \cos^2 \theta \gamma_{33} - n_e^4 \sin^2 \theta \gamma_{13})^2}{n_e n_o^3 r_{13}} \right]^2 \quad (7)$$

对于选定的晶体和特定的波长, γ_{13} 、 γ_{33} 、 n_o 、 n_e 等参量为常数, 衍射效率比 η_e/η_o 仅是角度 θ 的函数.

2 实验结果和讨论

我们首先研究了块状晶体的光开关性能, 所用晶体样品为山东大学晶体所生产的 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ Ce:KNSBN 块状晶体, 实验装置如图 1 所示. 从 He-Ne 激光器发出的 632.8 nm 激光经透镜 L_1 和 L_2 准直后, 通过偏振分束器 BS 后分为两束, 一束由反射镜 M_1 反射作为记录光 I_1 , I_1 的偏振态和光强由偏振片 P_1 和半波片 HWP_1 调节; 另一束由反射镜 M_2 反射作为记录光 I_2 , I_2 的偏振态和光强由偏振片 P_2 和半波片 HWP_2 调节. I_1 和 I_2 的入射角相等, 晶体的 C 轴方向如图 1 所示, 信号光经过晶体后由光电探测器接收, 并测量出射光的功率. 照射到晶体上的光束直径为 3 mm . He-Ne 激光器的输出功率为 30 mW . 调整 I_1 与 I_2 为 e 光, I_1 与 I_2 相互作用在晶体内写入体光栅, 然后挡住信号光 I_1 , 通过调节 I_2 偏振态和光强作为读出光来测量写入光栅的衍射效率. 实验过程中, 保持 $I_1 + I_2 = 4\text{ mW}$, 并且读出光 $I_3 \ll I_1, I_2$. 对于同一个写入的体光栅, 分别以 o 光和 e 光两种偏振态读出.

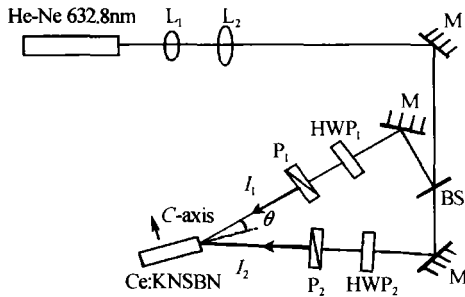


图 1 实验装置图
Fig. 1 The experimental setup

图 2 是块状晶体中衍射效率比 β 随入射角度 θ 的关系, 其中空心圆点是实验测得的数据点, 实线是根据式(7)计算得出的结果. 所用 Ce:KNSBN 晶体的参量为: $\gamma_{13} = 50\text{ pm/V}$, $\gamma_{33} = 270\text{ pm/V}$, $n_o = 2.35$, $n_e = 2.27$. 从理论曲线可以看出 θ 在 $[0^\circ, 20^\circ]$ 的范围内, 衍射效率比是随着入射角的增大而逐渐减小, 在 $\theta = 4^\circ$ 时, 衍射效率比 $\beta = 22$ 倍, 当 θ 增大到 18° 时, 衍射效率比下降为 17 倍. 而在实验中, 衍射效率比 β 随着入射角 θ 的增大而增大, 在入射角 $\theta = 4^\circ$, 衍射效率比 β 为 29 倍, 入射角度 $\theta = 18^\circ$ 时, 衍射效率比 β 达到了 72 倍. 实验数据与理论曲线有很大的差距, 这是因为实验中我们对记录光栅的读出是以原信号光 I_2 的入射方向作为读出光方

向来实现的, 当读出光 I_3 为 e 光时, 读出角度等于布喇格角; 而当读出光为 o 光时, 读出角度与布喇格角有一个偏差. 根据式(6)推导出 o 光读出角度与布喇格角度的偏移量 $\Delta\alpha$ 随入射角度 θ 的关系如图 3 所示. 当写入光栅的写入角度为 5° 时, $\Delta\alpha = 0.17^\circ$. 随着光栅写入角度的增加, o 光读出角度与布喇格角度的偏移量 $\Delta\alpha$ 增大. 当光栅的写入角度增大到 15° 时, $\Delta\alpha = 0.52^\circ$. 由于读出角度偏移布喇格角, 使得 o 光读出时的衍射效率比理论衍射效率要低得多, 所以在我们的实验中, 衍射效率比 β 与理论上的衍射效率比有较大的差距, 随着光栅的写入角度的增大, 衍射效率比 β 会随着增大.

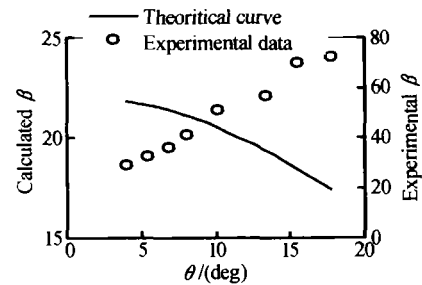


图 2 β 随入射角 θ 的变化情况
Fig. 2 β as a function of θ

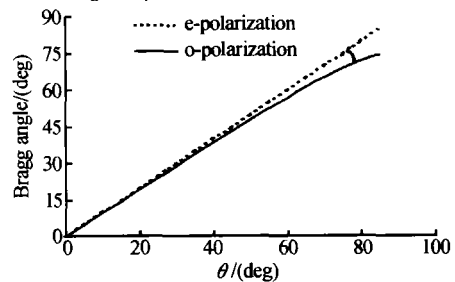


图 3 布喇格角与入射光角度 θ 的关系
Fig. 3 Bragg angle as a function of θ

图 4(a) 是块状晶体中 e 光读出与 o 光读出衍射效率随写入光强比 m 的实验数据, 光栅写入光 I_1, I_2 的入射角为 6° . 从图中可以看到, 衍射效率首先随着光强比的增大而逐渐增大, 在 $m = 0.6$ 时, 衍

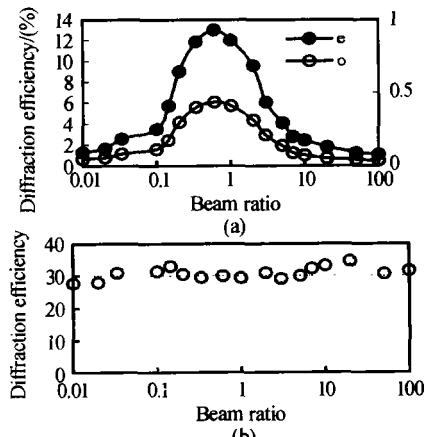


图 4 块状晶体中, 衍射效率随光强比的变化关系
Fig. 4 Diffraction efficiency as a function of the beam ratio in bulk crystal

射效率达到最大值,然后衍射效率随着光强比的增大逐渐减小.从实验结果可知,对于已记录的光栅,无论 e 光读出还是 o 光读出,衍射效率随光强比的变化趋势基本一致,最大光栅衍射效率所对应的光强比也相同.图 4(b)是 e 光读出与 o 光读出衍射效率比随写入光强比 m 的变化关系,从图中可以看出 e 光读出与 o 光读出衍射效率比 β 可近似为一常数($\beta=30$),不随写入光强比 m 的变化而变化,这在设定光开关阈值时十分有利.

我们进一步研究了 Ce:KNSBN 类光纤晶体的光开关性能,所用晶体尺寸为 $1\text{ mm} \times 1.9\text{ mm} \times 10\text{ mm}$.实验装置和图 1 相似,不同的是透镜 L_1 、 L_2 是把光会聚到类光纤晶体上,照射到晶体上的光束直径约为 0.7 mm ,实验过程中,保持 $I_1 + I_2 = 4\text{ mW}$,读出光 $I_3 \ll I_1, I_2$.

图 5 是光折变类光纤中 e 光读出与 o 光读出衍射效率比随写入光强比 m 的变化关系,从图中可以看出, e 光读出与 o 光读出衍射效率比 β 可近似为一常数($\beta=310$),不随写入光强比 m 的变化而变化.类光纤晶体的衍射效率比要远远大于块状中的衍射效率比.这同时表明 Ce:KNSBN 光折变类光纤晶体具有更好的光开关性能,更易于由偏振态控制实现光的开-关转换操作.

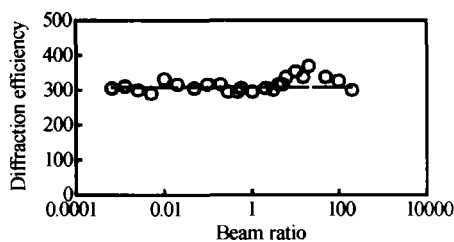


图 5 类光纤中, β 随光强比的变化关系

Fig. 5 β as a function of the beam ratio

为解释类光纤晶体比块状晶体更优良的开关特性,我们实验测量了这两类晶体的衍射效率随布喇格角偏移量的关系,如图 6 所示.从图中可以看出,

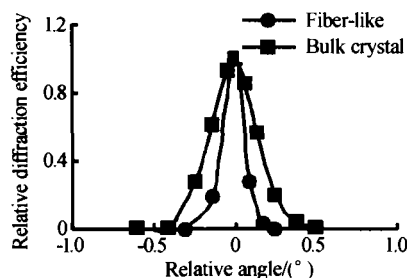


图 6 相对衍射效率随布喇格偏移量的变化

Fig. 6 Diffraction efficiency as a function of $\Delta\alpha$

类光纤晶体的布喇格偏移量在 $[-0.3^\circ, 0.25^\circ]$ 之间,而块状晶体的布喇格偏移量为 $[-0.6^\circ, 0.5^\circ]$,对于相同的偏移角度,类光纤晶体的衍射效率下降的幅度要比块状晶体大得多,从而使得 e 光读出和 o 光读出的衍射效率比也比块状晶体的大得多.而 L. Hesselink 等人则用小模式耦合的理论分析了 SBN 光折变光纤比块状晶体角度选择性灵敏度高的原因^[8],与我们的实验结果相符.

3 结论

综上所述, Ce:KNSBN 光折变类光纤中光栅的衍射效率受读出光偏振态的强烈影响, o 光读出与 e 光读出衍射效率之比不随写入光强比 m 的变化而变化, e 光读出时光栅的最大衍射效率与 o 光读出时光栅的最大衍射效率有着很大的差异,光折变类光纤的衍射效率比要远远大于块状晶体的衍射效率比,因此, Ce:KNSBN 类光纤晶体具有更好的光开关特性,可在光互连方面有着重要的应用.

参考文献

- 1 Yan Xiaona, Liu Liren. Theory of anisotropic diffraction based photorefractive switch. *Acta Optica Sinica*, 1999, **21** (10): 1249 ~ 1252
- 2 Boyland A J, Mailis S, Hendricks J M, et al. Electro-optically controlled beam switching via total internal reflection at a domain-engineered interface in LiNbO₃. *Opt Commun*, 2001, **197**(1-3): 193 ~ 200
- 3 Honma S, Okamoto A, Takayama Y. Photorefractive duplex two-wave mixing and all-optical deflection switch. *JOSA(B)*, 2001, **18**(7): 974 ~ 981
- 4 Taj I A, Xie P, Mishima T. Fast switching of photorefractive output by applied electric field. *Opt Commun*, 2001, **187**(1-3): 7 ~ 15
- 5 Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Bell Syst Tech J*, 1969, **48**(9): 2909 ~ 2947
- 6 Takayama Y, Okamoto A, Saito M, et al. Cross-polarized photorefractive four-wave mixing with extraordinary writing beams and an ordinary reading beam. *Appl Opt*, 1998, **37** (14): 2967 ~ 2973
- 7 Liu Hongli, Wang Zhaoqi, Liang Baolai, et al. Study on properties of two-wave coupling with Ce: KNSBN photorefractive fiber. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29** (8): 694 ~ 698
- 8 Hesselink L, Redfield S. Photorefractive holographic recordings in strontium barium niobate fibers. *Opt Lett*, 1988, **13**(10): 877 ~ 879

Photorefractive Fiber-like Optical Switch by Adjusting the Readout Beam Polarization

Liu Hongli¹, Wang Zhaoqi¹, Zhang Yinan¹, Hu Ping¹, Gao Weihua¹, Han Dewan²

1 Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

2 Department of physics, Yanbian institute of technology, Jilin 133002

Received date: 2003-04-21

Abstract The model of a photorefractive optical switch with Ce:KNSBN fiber-like crystal which is implemented by adjusting the polarization of the readout beam to control the diffraction efficiency of volume grating is proposed. The experimentally measured diffraction efficiency with extraordinary polarized readout beam is about 310 times that with ordinary polarized readout beam. The diffraction efficiency ratio in fiber-like crystal is about 10 times that in bulk crystal, which indicates that the Ce:KNSBN fiber-like crystal possesses excellent optical switch property.

Keywords Photorefractive fiber-like crystal; Diffraction efficiency; Optical switch

Liu Hongli was born in 1975, he received his B. S. degree from Shandong University in 1998 and he is now completing his Ph. D. degree at Institute of Modern Optics, Nankai University. His research interests include pattern recognition, optical information processing.

