

Ce: KNSBN 光折变晶体光栅衍射特性研究

梁宝来 王肇圻 官玖洪 母国光 傅汝廉

(南开大学现代光学研究所, 教育部光学信息技术科学开放研究实验室, 天津 300071)

摘 要 研究了 Ce: KNSBN 光折变晶体两波耦合作用写入体光栅的衍射效率与写入光偏振态和光强比的关系, 分析了写入光偏振态造成光栅衍射效率差别的原因, 并用修正耦合波理论对实验结果进行了拟合。实验结果为 Ce: KNSBN 晶体在全息记录和光学信息处理领域的应用提供了依据。

关键词 光折变光栅, 衍射效率, 两波耦合。

1 引 言

光折变晶体是一种理想的体全息存储和光学信息处理材料^[1]。而光折变晶体记录的体光栅的衍射特性是光折变晶体在全息记录和光学信息处理等应用中所面临的首要问题, 近年来已有许多报道^[25]。Hong 研究了 BaTiO₃ 晶体光栅衍射效率与写入光偏振态和光强比的关系, 给出了实验曲线和用修正耦合波理论拟合的结果^[6]。但关于 Ce: KNSBN 晶体光栅衍射特性的报道多集中于衍射的时间行为^[7]。本文在弱读出光条件下, 实验研究了写入光光强比和偏振态对 Ce: KNSBN 晶体中两波耦合物体光栅衍射效率的影响, 并采用修正耦合波理论对实验结果进行了拟合。

2 理论分析

理想体相位光栅的衍射问题可以由 Kogelnik 简单耦合波理论处理^[8], 但是对由两波耦合作用在光折变晶体内写入的体光栅, 由于强烈的能量转移效应, 造成光栅折射率调制不再是均匀的, 而是沿光波传播方向发生变化, 因而 Kogelnik 的简单耦合波理论不再正确。Hong 以 BaTiO₃ 晶体为基础对其进行了理论修正^[6]。

设光栅由写入光 I_{1W} 和 I_{2W} 通过两波耦合作用写入晶体, 读出光 I_{1R} 满足布拉格衍射条件, 并且读出光光强 I_{1R} 远小于光栅的写入光光强 I_{1W} 和 I_{2W} , 采用稳态耦合波理论可以得到两波耦合方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA_{1R}}{dz} &= \frac{-\alpha_R}{2 \cos \theta_R} A_{1R} - \frac{j\pi}{\lambda_R \cos \theta_R} \frac{\Delta n_s}{[\sqrt{\beta} \exp(\Gamma z/2) + \exp(-\Gamma z/2)/\sqrt{\beta}]} A_{2R}, \\ \frac{dA_{2R}}{dz} &= \frac{-\alpha_R}{2 \cos \theta_R} A_{2R} - \frac{j\pi}{\lambda_R \cos \theta_R} \frac{\Delta n_s}{[\sqrt{\beta} \exp(\Gamma z/2) + \exp(-\Gamma z/2)/\sqrt{\beta}]} A_{1R}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 A_{2R} 代表衍射光, α_R 为读出光吸收系数, Γ 为增益系数, $\beta = I_{1W}/I_{2W}$ 为写入光光强比, θ_R 为读出光布拉格角。定义新的变量:

$$\left. \begin{aligned} B_{iR}(z) &= A_{iR}(z) \exp[\alpha_R z / (2 \cos \theta_R)], & i &= 1, 2, \\ z' &= \frac{2}{\Gamma} \arctan[\exp(\Gamma z \sqrt{\beta}/2)], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

并代入(1)式中, 可进一步得到简化的耦合波方程:

$$\frac{dB_{1R}}{dz'} = i\kappa B_{2R}, \quad \frac{dB_{2R}}{dz'} = -i\kappa B_{1R}, \quad (3)$$

其中 $\kappa = \pi \Delta n_s / \lambda_R \cos \theta_R$ 是读出光和衍射光的振幅耦合常数。再定义边界条件 $A_{1R}(0) = A_0$, $A_{2R}(0) = 0$, 代入(3)式中求出衍射效率:

$$\eta = \left| \frac{A_{2R}(L)}{A_0} \right|^2 = \exp\left(-\frac{\alpha_R L}{\cos \theta_R}\right) \sin^2\left\{\frac{2\kappa}{\Gamma} [\arctan(e^{\Gamma/2} \sqrt{\beta}) - \arctan(\sqrt{\beta})]\right\}, \quad (4)$$

其中 L 为晶体有效作用长度。若 α_R 、 Γ 、 β 、 θ_R 、 κ 、 L 各量已知, 就可由(4)式计算光栅衍射效率。

3 实验和讨论

实验装置如图 1 所示, Ar^+ 激光器输出的 514.5 nm 激光被分束器 BS 分为两束, 一束由反射镜 M_1 反射, 经由半波片 HWP_1 和偏振片 P_1 入射到晶体上作为光栅的写入光 I_{1W} , 另一束由反射镜 M_2 反射, 经由半波片 HWP_2 和偏振片 P_2 入射到晶体上作为写入光 I_{2W} 。 I_{1W} 和 I_{2W} 的偏振态和光强均由半波片和偏振片调节, 光强调节范围为 $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ - $100 \text{mW}/\text{cm}^2$ 。在晶体另一侧 He-Ne 激光器输出的 632.8 nm 激光经由半波片 HWP_3 和偏振片 P_3 以布拉格角入射作为光栅的读出光 I_{1R} , I_{1R} 的偏振态和光强也由半波片和偏振片调节。本实验中 I_{1R} 光强为 $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 布拉格角 $\theta_R = 10.58^\circ$, 衍射光 I_{2R} 由光电探测器接收。本实验所用晶体为山东大学晶体研究所生产的 $5 \text{mm} \times 5 \text{mm} \times 5.5 \text{mm}$ Ce:KNSBN 晶体。为减小光束区域不重叠造成的实验误差, I_{1R} 、 I_{1W} 和 I_{2W} 均经仔细扩束。

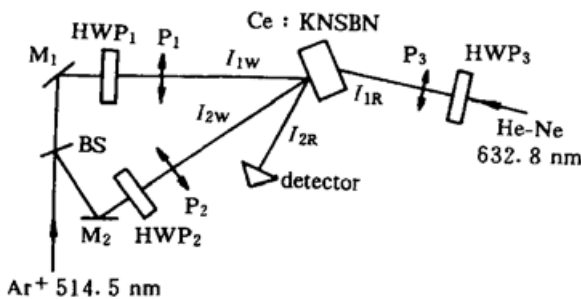


Fig. 1 Experimental setup

首先研究 e 光写入情况, 使 I_{1R} 、 I_{1W} 和 I_{2W} 均为 e 光, 在光强比 $\beta = 0.00350$ 范围内测量了衍射效率 η 随光强比的变化规律, 如图 2(a) 中数据点所示。当 $\beta = 0.003$ 时, 衍射效率 $\eta = 9\%$, 随着光强比的增大, 衍射效率逐渐增大, 当 $\beta = 0.1$ 时衍射效率达到最大值 $\eta = 28\%$, 而后衍射效率随光强比的增大而减小, 当 $\beta = 1$ 时衍射效率降为 $\eta = 18.9\%$, 当 $\beta = 50$ 时衍射效率降为 $\eta = 3\%$ 。把图 2(a) 的曲线与文献[6]中图 4(a) BaTiO_3 的实验曲线相比较, 发现它们有类似的行为: 均是单一峰值, 峰值点均在 $\beta = 0.1$ 附近。其次研究 o 光写入情况, 使 I_{1R} 仍为 e 光, 调整 I_{1W} 和 I_{2W} 为 o 光, 同样在光强比 $\beta = 0.00350$ 范围内测量了衍射效率 η 随光强比 β 的变化规律, 结果如图 2(b) 中数据点所示。从 $\beta = 0.003$ 开始, 衍射效率 η 为 1.9% , 随着光强比的增大, 衍射效率逐渐增大, 在 $\beta = 0.67$ 时衍射效率达到最大值 $\eta = 41\%$, 而后衍射效率 η 随光强比 β 的增大而减小。当 $\beta = 1$ 时衍射效率 η 降为 31% , 当 $\beta = 50$ 时衍射效

率降为 $\eta = 3.8\%$ 。同样地,把图 2(b)的曲线与文献[6]中图 4(b) BaTiO₃ 的实验曲线相比较,发现它们有较大的不同:本文图 2(b)是单一峰值,峰值点在 $\beta = 0.67$ 附近;文献[6]中图 4(b)是两个峰值,分别在 $\beta = 0.08$ 和 $\beta = 9$ 附近。然后根据(4)式对实验结果进行理论拟合。公式中的参量 β 、 θ_R 、 L 已知, α_R 由实验测得为 0.23 cm^{-1} , Γ 和 κ 设为拟合变量,拟合结果由图 2 中曲线表示,与实验测量结果基本吻合。由理论拟合过程可求得本实验所用 Ce: KNSBN 晶体的 Γ 和 κ 参量的拟合值, e 光写入条件下, $\kappa = 2.75 \text{ cm}^{-1}$, 增益系数 $\Gamma = \Gamma_e = 8.3 \text{ cm}^{-1}$; o 光写入条件下, $\kappa = 2.6 \text{ cm}^{-1}$, 增益系数 $\Gamma = \Gamma_o = 2.35 \text{ cm}^{-1}$ 。上述数据与文献[6]中给出的 BaTiO₃ 晶体的数据 ($\kappa_o = 10 \text{ cm}^{-1}$, $\Gamma_o = 1 \text{ cm}^{-1}$) 有较大差异,正是由于这种差异造成它们衍射行为的不同。作者采用文献[7]的方法,对晶体的增益系数 Γ 进行实测,测量结果为 $\Gamma_e = 8.08 \text{ cm}^{-1}$, $\Gamma_o = 2.31 \text{ cm}^{-1}$, 实验值与理论拟合值相符,说明(4)式是适用的。

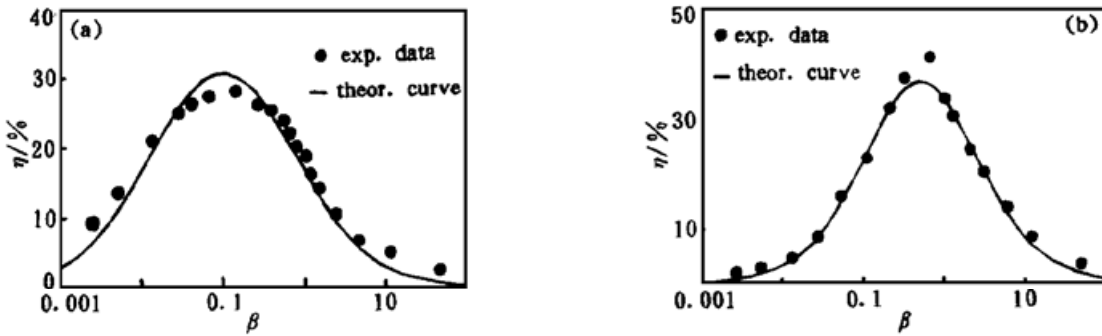


Fig. 2 Diffraction efficiency η as a function of the beam ratio β . (a) e-write/e-read, (b) o-write/e-read

由图 2 可见, e 光写入和 o 光写入两种情况下光栅衍射效率 η 的变化规律存在显著差别。1) 对于同一 β 值,两种光写入光栅的衍射效率取值不同,哪种光的光栅衍射效率更大一些,要视 β 的具体值而定; 2) 光栅衍射效率峰值不同, e 光写入,最大光栅衍射效率为 28%, o 光写入,最大光栅衍射效率为 41%; 3) 两种情况下最大光栅衍射效率所对应的光强比不同, o 光写入,在 $\beta = 0.67$ 时有最大衍射效率, e 光写入条件下,最大衍射效率却在 $\beta = 0.1$, 比 o 光的要小很多。写入光的偏振态对光栅衍射效率有重要的影响,这是由于不同偏振态条件下两波耦合作用和能量转移强弱不同。在 o 光写入下,两束写入光耦合作用较小 ($\Gamma_o = 2.35 \text{ cm}^{-1}$), I_{2W} 仅有少部分能量转移到 I_{1W} 中;而在 e 光写入条件下,两束写入光强烈耦合 ($\Gamma_e = 8.3 \text{ cm}^{-1}$), I_{2W} 有较多能量转移到 I_{1W} 中。因此与 o 光相比, e 光写入光栅的衍射效率最大值对应更小的光强比 β 。

采用(4)式计算不同晶体厚度下衍射效率 η 随光强比 β 的变化规律,结果如图 3 所示。e 光写入和 o 光写入光栅的衍射效率峰值都随晶体厚度的增大而向 β 小的方向移动,但比较而言, e 光写入光栅的衍射效率峰值移动得更快。这是因为无论 e 光或 o 光写入光栅,写入光的能量转移都随着晶体厚度增加而增大,所以 η 随晶体厚度的增大而向 β 小的方向移动。但与 o 光比较, e 光写入时光束耦合作用更强烈,所以晶体厚度的增加造成的能量转移的变化也更显著,衍射效率峰值向 β 小的方向移动得更快。

在进一步的实验中,对比测量了 e 光和 o 光在晶体前后的光栅调制度变化规律,它反映了实际晶体两波耦合作用的强弱。设光栅写入光 I_{1W} 和 I_{2W} 通过晶体后的出射光为 I'_{1W} 和 I'_{2W} , 定义 $m = 2(I_{1W}I_{2W})^2 / (I_{1W} + I_{2W})$ 代表写入光栅的调制度, $m' = 2(I'_{1W}I'_{2W})^2 / (I'_{1W} + I'_{2W})$ 代表晶体后的光栅调制度。图 4(a) 为 e 光写入情形, m'_e 代表晶体后的调制度;图 4(b) 为 o 光写

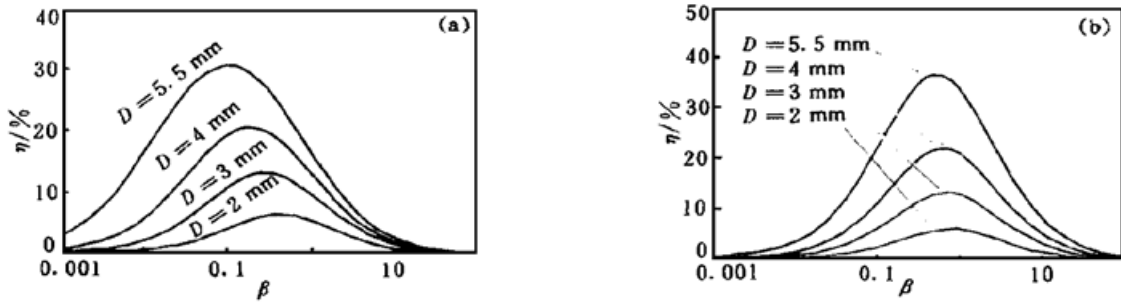


Fig. 3 Diffraction efficiency η as a function of the beam ratio β in different crystal thickness D . (a) e -write, (b) σ -write

入情形, m'_o 代表晶体后的调制度。从图 4(a) 可以看到当 β 从 10 逐渐减小, 即写入光栅调制度 m 从 0.57 逐渐增大时, m'_e 也从 0.52 逐渐增大; 当 β 值减小到 1, 即写入光栅调制度达到 1 时, m'_e 增大到 0.94; 当 β 值继续减小时, 写入光栅调制度开始下降而 m'_e 继续上升; 当 β 值减小到 0.11, 即写入光栅调制度下降到 0.6 时, m'_e 达到它的最大值 1, 而后随 β 值的减小, m'_e 非常缓慢地衰减; 当 β 值减小到 0.02, 即写入光栅调制度衰减到 0.28 时, m'_e 仍有 0.95 的高值, 这表明有大部分能量从 I_{2W} 转移到了 I_{1W} 中。从图 4(b) 可以看到当 β 从 10 逐渐减小, 即写入光栅调制度从 0.57 逐渐增大时, 晶体后调制度 m'_o 从 0.42 逐渐增大; 当 β 值减小到 1, 即写入光栅调制度达到 1 时, m'_o 增大到 0.94; 当 β 值继续减小时, 写入光栅调制度开始下降而 m'_o 继续上升; 当 β 值减小到 0.33, 即写入光栅调制度下降到 0.87 时, m'_o 达到它的最大值 1, 然后随着 β 值的减小, m'_o 开始下降; 当 β 值减小到 0.02, 即写入光栅调制度衰减到 0.32 时, m'_o 衰减到 0.41, 其衰减速度比 m'_e 快很多。晶体后光栅调制度的不同变化规律反映了 e 光写入和 o 光写入情况下光束耦合特性的差异, 因而造成了衍射特性的不同。

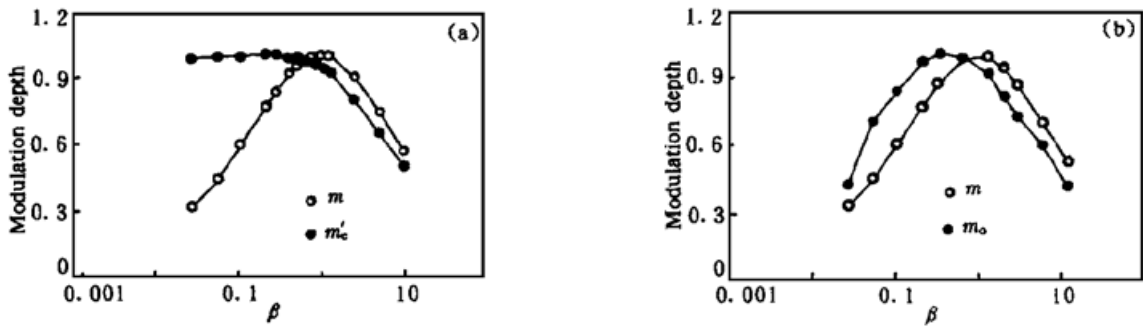


Fig. 4 Modulation depth as a function of β . (a) e -write, (b) σ -write

综上所述可知, 光折变光栅的衍射效率受写入光两波耦合作用和能量转移效应的影响, 修正耦合波理论正是考虑了两波耦合作用和能量转移效应, 所以较好地拟合了实验结果。写入光两波耦合作用和能量转移效应的强弱与写入光偏振态和光强比等参量紧密相关, 写入光参量的不同会造成光栅衍射效率的极大差别。在用 Ce: KNSBN 晶体作全息纪录的应用中, 光栅的衍射行为至关重要, 它关系到再现图像的保真性。所以本文数据对 Ce: KNSBN 晶体在全息存储和光学信息处理领域的应用具有重要意义。

结 论 在弱读出光条件下研究了 Ce: KNSBN 光折变晶体两波耦合作用写入体光栅的衍射效率与写入光偏振态以及光强比的关系, 发现 e 光写入和 o 光写入两种情况下光栅衍射效率的变化规律存在明显差别: o 光写入光栅的衍射效率最大值要大于 e 光写入光栅; e 光写入光栅

的衍射效率最大值对应更小的光强比 β ; 在 β 值相同时两种光写入光栅的衍射效率取值不同, 哪种光的衍射效率更高要视 β 具体值而定。存在这种差别的原因归于不同偏振态光在写入光栅过程中能量转移效应不同。本文采用修正耦合波理论对 Ce: KNSBN 晶体的实验结果进行了理论拟合, 理论结果与实验结果非常符合。本文还对 Ce: KNSBN 晶体与 BaTiO₃ 晶体的衍射特点进行了对比研究, 它们的异同点反映了这两类晶体增益系数和耦合系数的差异。本工作为 Ce: KNSBN 晶体在全息存储和光学信息处理领域的应用提供了重要依据。

参 考 文 献

- [1] Gunter P. Holography, coherent light amplification and optical phase conjugation with photorefractive materials. *Phys. Rep.*, 1982, **93**(4): 201299
- [2] Saxena R, Vachss F, McMichael I. Diffraction properties of multiple-beam photorefractive gratings. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1990, **7**(7): 12101215
- [3] Hong J H, Yeh P. Diffraction efficiency of strong volume holograms. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(6): 344346
- [4] Zhou Hanying, Zhao Feng, Yu F. Angle-dependent diffraction efficiency in a thick photorefractive hologram. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(8): 13031309
- [5] Cai L Z, Yeh P, Liu H K. Meam fringe contrast, optimum beam ratio and maximum diffraction efficiency for volume gratings written by coupled waves. *Opt. Commun.*, 1996, **132**(1, 2): 4854
- [6] Hong J H, Saxena R. Diffraction efficiency of volume holograms written by coupled beams. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(3): 180182
- [7] Wang Haiyu, Tian Mingzhen, Lin Jiuling. Study of two-wave coupling in Cu: KNSBN using red light. *Opt. Comm.*, 1995, **115**(5, 6): 563567
- [8] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Bell. Syst. Tech. J.*, 1969, **48**(9): 29092947

Diffraction Property of Photorefractive Volume Grating in Ce: KNSBN Crystal

Liang Baolai Wang Zhaoqi Guan Jiuhong

Mu Guoguang Fu Ruliang

(*Opto-Electronic Information Science and Technology Laboratory,
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 25 January 1999; revised 15 April 1999)

Abstract The relation between the diffraction efficiency of volume grating written by two wave mixing in Ce: KNSBN photorefractive crystal and writing beam parameters such as polarization and beam ratio was studied. The phenomenon that the diffraction efficiency strongly depends on writing beams polarization was analyzed, and the modified coupled-wave theory was used to fit the experimental data. The results give a powerful support to the application of Ce: KNSBN crystal in holographic recording and optical information process.

Key words photorefractive grating, diffraction efficiency, two-wave mixing.