

光折变晶体中非相干光前向耦合及其 对噪音栅擦除的研究*

丁 欣 王 鹏 朱 孟 姚建铨

王奎雄 李 卓 禹宣伊

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072) (长春光学精密机械学院应用理学院 长春 130022)

提要 对光折变晶体 $\text{Ce} \cdot \text{KNSBN}$ 中两束 e 偏振简并非相干光的前向耦合进行了理论分析和实验研究, 并通过非相干光耦合作用在实验上获得了亮环和暗环的衍射图样, 从而获得了一种利用非相干光擦除来克服光折变晶体中扇形效应的简便方法。

关键词 非相干光耦合, 锥光衍射, 暗环, 噪音栅擦除

1 引 言

考虑到光折变效应的微观作用机制, 光折变晶体中通过干涉条纹写入的动态体相位栅是光折变效应产生的物理基础, 因此在研究光折变效应的特性和应用时多使用互相干光束, 而非相干光耦合方面则较少涉及。对于非相干光耦合作用, 虽然不能通过干涉条纹写入共同光栅, 但非相干光却可以通过扇形效应在光折变晶体中写入各自的噪音栅, 因此, 非相干光耦合主要是通过各自的噪音栅来完成的。目前对非相干光耦合作用的研究主要是形成位相共轭光, 其中较为完善的装置为双位相共轭镜(DPCM)^[1]和双色抽运振荡器(DCPO)^[2]。本文研究的是前向非相干光的耦合相互作用过程, 即两束非相干光从晶体的同一个面入射, 一束光在另一束光形成的噪音栅上锥光衍射形成亮环, 该衍射光又与入射光本身写入一套新的光栅, 它选择性地擦除了前面已经存在的噪音栅, 从而在扇形光中产生暗环。本论文对此问题进行了理论分析和实验研究, 并获得了利用非相干光擦除来克服光折变效应中扇形全息的一种简便方法。

2 前向非相干光耦合理论分析

2.1 锥光衍射——亮环的形成

锥光衍射是指一束光通过扇形效应在光折变晶体中形成的一部分噪音栅被满足 Bragg 条件的另一束非相干光读出, 即这束光被噪音栅衍射, 从而形成读出光的部分散射光放大。由于晶体中噪音栅的分布是立体的, 考虑三维情况, 满足 Bragg 条件的衍射区是一个环, 从而形成锥光衍射。

* 教育部光电信息技术科学开放实验室资助项目。

收稿日期: 1998-12-15; 收到修改稿日期: 1999-04-05

我们可以用动量空间来描述,如图 1(a)所示。设两束入射光均为 e 光且波矢为 \vec{k}_1, \vec{k}_2 , 则光束 \vec{k}_2 产生的一系列扇形光波矢 \vec{k}_{2f} 可以画为以 $\vec{k}_1 + \vec{k}_2$ endpoint 为中心的旋转椭球面。则

$$\vec{k}_{2f} = \vec{k}_2 + \vec{k}_{2g} \tag{1}$$

\vec{k}_{2g} 为噪音栅波矢。

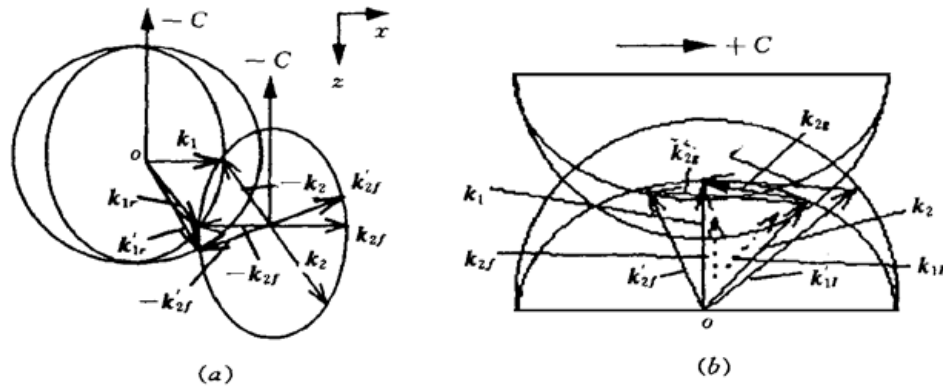


图 1 锥光衍射相位匹配图

(a) 动量空间波矢面; (b) 晶体内相位匹配图

Fig. 1 Phase-matching diagram for cross-readout conical diffraction

(a) wavevector surface in the momentum space; (b) phase-matching diagram in crystal

考虑到各向同性和各向异性光散射,由 \vec{k}_1 读出光产生的散射光可以画为以原点 O 为中心的椭球面(e 光)或球面(o 光)。当 \vec{k}_1 光入射时,满足 Bragg 条件的可能的衍射光 \vec{k}_{1r} 在动量空间为描述 \vec{k}_{1r} 和 \vec{k}_{2f} 的椭球面的交接处,从而形成 \vec{k}_1 的散射光的放大。当入射光波长相同时,相位匹配条件如图 1(b)所示,可以看出,当 \vec{k}_1 光入射时, \vec{k}_2 的扇形光中必然存在一束光,使得 \vec{k}_1 在 \vec{k}_2 与这束光形成的噪音栅上衍射产生的衍射光满足相位匹配条件

$$\begin{aligned} \vec{k}_{2f} - \vec{k}_2 &= \vec{k}_1 - \vec{k}_{1r} = \vec{k}_{2g} && \text{(各向同性衍射)} \\ \vec{k}_{2f}' - \vec{k}_2 &= \vec{k}_1 - \vec{k}_{1r}' = \vec{k}_{2g}' && \text{(各向异性衍射)} \end{aligned} \tag{2}$$

其中 \vec{k}_{2f}' 和 \vec{k}_{2g}' 为 \vec{k}_1 各向异性衍射时 \vec{k}_2 产生的扇形光和噪音栅波矢, \vec{k}_{1r}' 为 \vec{k}_1 的各向异性衍射光。在入射平面内,当入射光波长相等且均为 e 光时,对于各向同性衍射, $\vec{k}_1 \parallel \vec{k}_{2f}, \vec{k}_2 \parallel \vec{k}_{1r}$, 形成的亮环通过 \vec{k}_1, \vec{k}_2 的光斑; 各向异性衍射光的衍射角 α 与 \vec{k}_2, \vec{k}_1 晶体内的入射角 α_1, α_2 之间的关系满足关系式^[3]

$$\begin{aligned} n_e^2 \left[\sqrt{\frac{n_o n_e^2}{n_e^2 + n_o^2 \cot^2 \alpha_2}} - \sqrt{\frac{n_o n_e^2}{n_e^2 + n_o^2 \cot^2 \alpha_1}} + n_o \sin \alpha \right]^2 + \\ n_o^2 \left[\sqrt{\frac{n_o n_e^2}{n_e^2 \tan^2 \alpha_1 + n_o^2}} + \sqrt{\frac{n_o n_e^2}{n_e^2 \tan^2 \alpha_2 + n_o^2}} - n_o \cos \alpha \right]^2 = n_o^2 n_e^2 \end{aligned} \tag{3}$$

对于本实验所用 Ce·KNSBN 晶体, $n_o = 2.35, n_e = 2.27$ 。

以上理论说明是假定扇形光在晶体中分布是全方位的,但在实际情况中,因为扇形光只能存在于某些特定方向,对于一定晶体取向和入射光方向,读出光只有沿着扇形光方向才可能在噪音栅上衍射。考虑三维情况,满足 Bragg 条件的区域是一个环,因而衍射光为一光锥。

考虑到产生各向同性或各向异性衍射的条件^[4]: (1) 相位匹配条件; (2) 相应的极化率张

量元 δx_{ij} 及有效电光系数 r_{eff} 不为 0。本实验采用 Ce·KNSBN 晶体, 属 $4mm$ 点群, 其 δx_{ij} 为

$$\delta(x) = \begin{bmatrix} n_o^4 r_{13} k_3 & 0 & n_o^2 n_e^2 r_{51} k_1 \\ 0 & n_o^4 r_{13} k_3 & n_o^2 n_e^2 r_{42} k_2 \\ n_o^2 n_e^2 r_{51} k_1 & n_o^2 n_e^2 r_{42} k_2 & n_e^4 r_{33} k_3 \end{bmatrix}$$

其中 $r_{13}, r_{33}, r_{42} = r_{51}$ 为有效电光系数, k_1, k_2, k_3 为光栅波矢 \vec{k}_g 在 x, y, z 轴上的投影。张量的对角元素不为零意味着允许各向同性光散射, 而非对角元素是否为零决定各向异性光散射的可能性。本实验光栅位于 xz 平面内, 因而写入光无论是寻常光还是异常光之间的耦合以及各向同性、各向异性衍射都是允许的。在满足 Bragg 条件的情况下会出现两个衍射亮环, 对于 KNSBN 负单轴晶体, 内侧为异常光(e 光), 外侧为寻常光(o 光)。

2.2 非相干光耦合形成暗环

一束光对另一束光的噪音栅进行选择擦除是暗环形成的根本原因。当锥光衍射是各向同性时, 其形成亮环的衍射光 \vec{k}_{1r} 可以与读出光 \vec{k}_1 再发生耦合从而写入新的光栅 \vec{K} 。由(2) 式得

$$\vec{K} = \vec{k}_{1r} - \vec{k}_1 = -\vec{K}_{2g} \tag{4}$$

由上式可见, 形成的新的光栅与产生衍射的噪音栅反向, 即有 180° 相位差。根据电磁理论, 当读出光在噪音栅上 Bragg 衍射时, 读出光和衍射光相干所形成的干涉条纹与发生衍射的噪音栅有 90° 的相移, 当这种干涉条纹通过线性电光效应而形成新的折射率光栅时又引入了 90° 相移, 从而使得新产生的光栅与发生衍射的噪音栅有 180° 相移。根据带运输模型理论, 这样两种位相差为 180° 的光栅相互作用的结果使得它们互相擦除, 这样, 两束入射光的散射光满足 Bragg 条件的那部分不再被放大, 从而在扇形光中形成暗环。

暗环的稳态情形可由前向四波混频^[5]来近似描述, 如图 2 所示。 \vec{k}_1 和 \vec{k}_2 分别为入射光波矢, \vec{k}_4 和 \vec{k}_3 分别是由 \vec{k}_1 和 \vec{k}_2 产生的散射光波矢, 并且在 xz 平面内。光场为

$$\vec{E}_j = \vec{A}_j(\vec{r}) \exp[i(\vec{k}_j \cdot \vec{r} - \omega t)] \quad \vec{E} = \sum_j \vec{E}_j \quad j = 1 \sim 4 \tag{5}$$

由于入射光为非相干光, 只能分别与各自的散射光形成噪音栅, 考虑相位失配 $\Delta\vec{K} = \vec{k}_1 - \vec{k}_4 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3$, 光折变相位栅写成

$$n = n_o + \frac{n_1}{2} \exp(i\phi) \frac{A_1^* A_4 + A_3^* A_2}{I_0} \exp[i(\vec{K} \cdot \vec{r} - \Delta\vec{K} \cdot \vec{r})] + c.c \tag{6}$$

带入耦合波方程, 并考虑到缓变振幅近似、抽运非耗尽条件及相位失配, 有

$$\frac{dA_3}{dx} = -\frac{\gamma}{I_0} [A_3 A_2^* + A_4^* A_1 \exp(-i\Delta K x)] A_2 \tag{7}$$

$$\frac{dA_4}{dx} = \frac{\gamma^*}{I_0} [A_3 A_2^* \exp(i\Delta K x) + A_4^* A_1]^* A_1 \tag{8}$$

其中 γ 为耦合系数, I_0 为总光强, ΔK 为 $\Delta\vec{K}$ 在 x 方向的投影。

考虑到晶体的表面缺陷, 可设边界条件为

$$A_3(x=0) = A_3(0) \quad A_4^*(x=0) = A_4^*(0)$$

$A_4(0)$ 和 $A_3(0)$ 分别为第一束光和第二束光的散射光(没放大时)。设参数

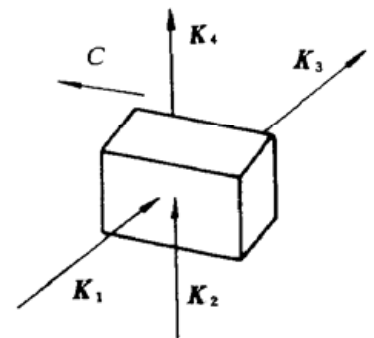


图 2 前向四波混频简图
Fig. 2 Forward four-wave mixing geometry

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad s = (\gamma^2 P^2 - \Delta K^2 - 2i\Delta K \gamma)^{1/2}$$

$$D_3 = [2A_3(0)(i\Delta K - \gamma + s) - \gamma A_1 A_2 A_4(0)]/s$$

$$D_4 = \frac{D_3}{2} I_0(i\Delta K - \gamma - s)/\gamma A_1 A_3$$

l 为相互作用长度, 则

$$A_3(x=l) = \exp(-i\Delta K l/2) \exp(\gamma P l/2) \times \left[2D_3 \sinh\left[\frac{s l}{2}\right] + A_3(0) \exp\left[\frac{-s l}{2}\right] \right] \quad (9)$$

$$A_4^*(x=l) = \exp(-i\Delta K l/2) \exp(\gamma P l/2) \times \left[2D_4 \sinh\left[\frac{s l}{2}\right] + A_4(0) \exp\left[\frac{s l}{2}\right] \right] \quad (10)$$

在相位匹配区 $\Delta K = 0$ 。若令 $I_1 = I_2$, 即入射光强相等, 则

$$P = 0 \quad A_3(x=l) = A_3(0) \quad s = 0 \quad \sinh\left[\frac{s l}{2}\right] = 0$$

$$\text{所以} \quad A_3(x=l) = A_3(0) \quad A_4^*(x=l) = A_4(0) \quad (11)$$

由(11)式可见, 稳态情况时, 在相位匹配区附近, 相等光强的入射光所产生的散射光仍为初始值, 并没有被放大, 这说明没有通过噪音栅的耦合作用形成扇形光和衍射光, 即噪音栅已被擦除了。

3 锥光衍射及暗环的实验研究

Ce·KNSBN 光折变晶体的两束偏振非相干光分别来自两台 He-Ne 激光器, 波长为 632.8

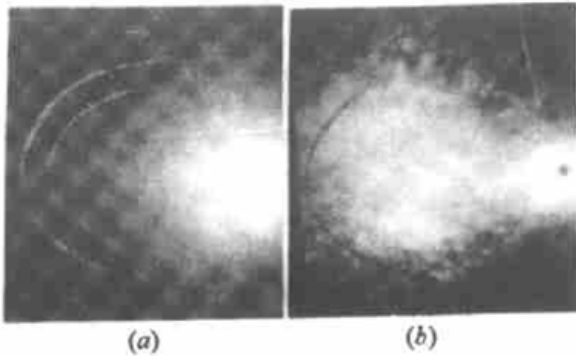


图 3 亮环 (a) 和暗环 (b)

Fig. 3 Photograph of bright ring (a) and dark ring (b)

nm, 沿 xz 平面入射, 光的偏振方向在入射主截面内 (e 光), 晶体光轴 (c 轴) 沿 z 方向。调节衰减片, 使两光强均为 15 mW。先使一束光与光轴夹角为 60° 入射到晶体中, 使其充分形成自己的噪音栅, 时间为 120 s。关闭此光, 同时让第二束光入射到第一束光的扇形光中, 与光轴夹角为 90° , 可以看到它在噪音栅上发生锥光衍射, 如图 3 (a) 所示, 观察到亮环通过两光斑且由强变弱持续 7 s 后消失。根据 (3) 式, 在此种入射情况下, 各向异性衍射光的衍射角理论值应为 47.9° , 实际测得外侧亮环衍射角为 48.4° , 符合较好, 说明外侧为各向

异性衍射光, 同时利用检偏器检测, 发现外侧亮环确为 o 光, 内侧亮环为 e 光。

重复前面操作, 只是第二束光入射时并不关闭第一束光, 可以看到第二束光入射瞬间, 也有锥光衍射, 达到稳态后, 第一束光的扇形光明显变弱, 并且在其扇形光中形成暗环, 暗环通过第二束光的光斑, 且暗环位置与各向同性衍射 (内侧亮环) 位置呈中心对称, 如图 3 (b) 所示。

4 克服扇形效应的研究

由前面的实验观察到, 第二束光入射后, 第一束光形成的扇形光变弱, 这说明第二束非相干光对噪音栅进行了很好的擦除。此现象, 给我们提供了一种用非相干光克服扇形效应的新思

路。在基本的相干光双光耦合装置中,对于较大耦合系数的晶体,抽运光和信号光的能量大量转移到扇形光中,使净增益降低,信噪比下降。利用本文实验现象,可以引入一束非相干光,让它与抽运光耦合,达到稳态后形成暗环,这时再让信号光入射到暗环中去,由于此时噪音栅已被擦除,因而可以很好克服以上问题。从增益的观点来看,虽然非相干光也可以对抽运光和信号光形成的共同栅进行擦除,使增益减小,但由于各自的扇形光很弱,这使得抽运光和信号光的耦合能量增加,同时由于噪音栅的消除,使光折变晶体内更加均匀,抽运光和信号光的有效相互作用长度变长,使增益变大。这两种过程综合的结果,可使得双光耦合增益保持不变,从而使耦合达到预期的结果。

由于这种方法需要引入第三束光且对入射角度有一定要求,为此根据本实验所用的晶体 Ce·KNSBN,采用调节耦合光的偏振方向来获得非相干光,得到另一种较为简便有效的方法^[6]。调节半波片,使入射光不再是 e 光,而是与 e 光偏振方向有一夹角,这种偏振态的一束光可以看作是一束 e 光和一束 o 光的合成。对于 Ce·KNSBN 晶体,由于 o 光之间的耦合系数远小于 e 光之间的耦合系数且 o 光和 e 光的耦合是禁止的,因此,这束作为 o 分量的 o 光实质上可以看作一束非相干光。这样引入的非相干光有两点好处,一是 o 光总是沿着入射光束,且其擦除效果并不是瞬时的,二是 o 光和 e 光的比例可调,从而使擦除也变得可调。

先通过一束入射光的透射光强的变化来验证此方法。当一束光强 $I_0 = 20.3 \text{ mW}$ 的光与光轴成 90° 入射,调节半波片改变入射光的偏振态,120 s 后可以测出透射光强随入射光中 e 光所占比例 P 的变化曲线,如图 4(a) 所示。纯 e 光入射时($P = 1$),透射光强为 12.31 mW ,约为入射光强的 61.5%,近 40% 的入射光能量转移到扇形光中;而当 $P = 0.42$,透射光强达到最大,为 17.7 mW ,占入射光强的 88.5%,此时由于扇形效应而转移的能量最小,说明此方法可行。

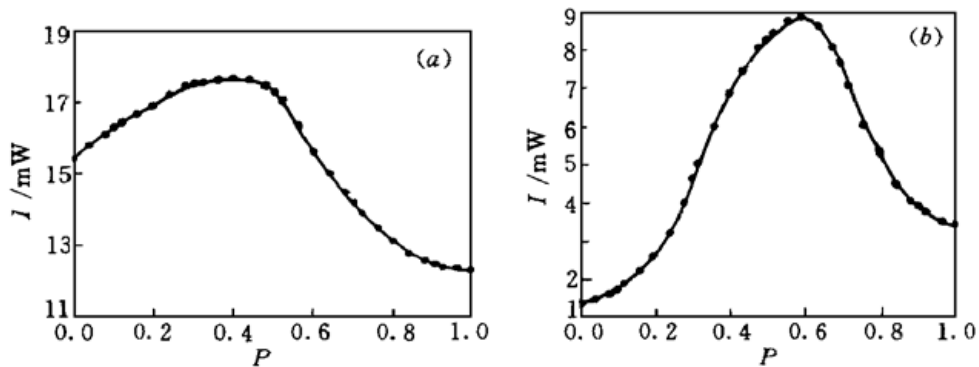


图 4 透射光强 (a) 及信号光强 (b) 与非相干光擦除参数 P 的关系曲线

Fig. 4 Transmitted intensity (a) and signal beam intensity (b) as a function of incoherent erasure parameter P

由于双光耦合装置,也可以测出信号光强随入射光中 e 分量比例 P 的变化曲线,如图 4(b) 所示。两束耦合光可由分束器获得,调节半波片,可以对两入射光的偏振态进行调节,从而使两束耦合光的扇形效应均能得到抑制。入射抽运光光强为 $I_1 = 16.8 \text{ mW}$,信号光光强为 $I_2 = 1.3 \text{ mW}$ 。实验中,当两入射光均为 o 光时($P = 0$),被放大的信号光光强为 1.42 mW ,说明 o 光间的耦合很小;两入射光均为 e 光时($P = 1$),被放大的信号光光强为 3.4 mW ;当 $P = 0.61$ 时,被放大的信号光光强达到最大,为 8.9 mW ,是纯 e 光时的 2.62 倍。由此可见,虽然基本不参与耦合的 o 光占 39%,但信号光的放大作用仍很明显,说明这种方法对扇形效应的克服效果比较

明显。

5 结 论

在前向非相干光入射的情况下,一束光在另一束光形成的噪音栅上衍射,若满足 Bragg 条件,则可以产生锥光衍射(包括各向同性和各向异性衍射)。同时,各向同性衍射光又与入射光一起写入一组新的光栅,这组光栅与原有的噪音栅存在 180° 的相位差,相互作用的结果使得这两组光栅互相擦除,这样散射光中满足 Bragg 条件的那部分不再被放大,从而形成暗环。利用暗环或 o 光和 e 光耦合系数的不同,通过调节入射偏振光的偏振态使其 o 光分量作为用来擦除的非相干光,获得了一种克服扇形效应的简便方法,并得到了实验验证。

参 考 文 献

- 1 Shimon Weiss, Shmuel Sternklar, Baruch Fischer. Double phase conjugate mirror: analysis demonstration and applications. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(2): 114~ 116
- 2 B. Fischer, S. Sternklar, S. Weiss. Photorefractive oscillators. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(3): 550~ 569
- 3 Liu Simin, Zhang Guoquan, Zhang Guangyin *et al.*. Enhancement of the intensity of anisotropic scattering cones by shared grating. *J. Physics in Chinese* (物理学报), 1995, **44**(7): 1035~ 1041 (in Chinese)
- 4 Liu Simin. Guo Ru. Ling Zhenfang. Nonlinear Optics of Photorefractive Effect. Beijing: China Standard Publishing House, 1992. 141~ 142 (in Chinese)
- 5 B. Fischer, Jeffrey O. White, Mark Cronin-Golomb *et al.*. Nonlinear vectorial two-beam coupling and forward four-wave mixing in photorefractive materials. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(4): 239~ 241
- 6 Q. Byron He, Pochi Yeh. Fanning noise reduction in photorefractive amplifiers using incoherent erasures. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2): 283~ 287

Study of the Coupling of Mutually Incoherent Beams in Forward Direction and Fanning Reduction by Using Incoherent Erasure

Ding Xin Wang Peng Zhu Meng Yao Jianquan

(College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Optoelectronic Information Science and Technology Lab, Tianjin University, Tianjin 300072)

Wang Kuixiong Li Zhuo Yu Xuanyi

(College of Applied Physics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

Abstract The coupling of two mutually incoherent beams of extraordinary polarization of degenerate wavelengths in the forward direction in photorefractive Ce³⁺:KNSBN crystal is theoretically analyzed and experimentally demonstrated. The bright and dark rings due to coupling of two incoherent beams were observed and a new method of fanning reduction by using incoherent erasure are proposed in photorefractive crystal.

Key words coupling of mutually incoherent beams, conical diffraction, dark ring, fanning grating reduction