

等相面畸变对光折变相位共轭波前的影响

严 瑗 朱文勇 孙 宏 徐乃庄
(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

提 要

根据二波相互作用的耦合波方程组,研究了空间电荷场等相面发生倾斜和弯曲的规律及由此产生的四波混频(FWM)中相位共轭波的两类波前畸变,并给出了定量表示的具体方法.以 BSO 晶体为例数值计算了各种实验参数的影响,结合相位共轭波衍射效率和角分辨率,讨论了晶体厚度和外加电场等参数的合理选取.

关键词 相位共轭, 波前畸变, 空间电荷场, 等相面.

1 引 言

当前,光折变效应的研究在非线性光学领域中是极为活跃的课题之一,常用的晶体有 LiNbO_3 ^[1]、 BTO ^[2]、 SBN 、 BSO ^[3] 等,光折变效应目前在光计算、光放大和光存储^[4]等方面,都得到广泛应用,而光学相位共轭^[5]则是其中一个重要研究领域.

现在,有关光折变效应的理论日渐成熟,如已发展了描述动态^[6]和瞬态^[7]相互作用的理论等.近年来,实验中又发现光折变晶体的吸收系数在强光下会随光强发生变化,并得到了包括吸收及非线性吸收在内的耦合波方程^[8].

本文在考虑到光折变晶体中非线性吸收及自衍射影响的基础上,推导了二波相互作用时晶体内稳态空间电荷场的耦合波方程组;提出了由于空间电荷场等相面的倾斜和弯曲所产生的相位光栅畸变,导致了在四波混频实验中相位共轭波的两类波前畸变,并给出了畸变的定量描述方法;提出了耦合波方程组的一种数值求解方法,以 BSO 晶体为例计算了畸变随外加电场、晶体的载流子浓度、晶体厚度等参数的变化;进一步讨论了适当选取各类参数的重要性.

2 理 论

常见的 BSO 晶体吸收系数较大,且与光强有关,可近似表示为 $\alpha = \alpha_0 + bEE^*$,其中 b 是比例系数;故在二波相互作用时同时存在相位光栅和振幅光栅.^[9]设两束平行光对称入射到晶体上,如图 1 所示, R 、 S 为参考光和信号光的复振幅, E_1 为空间电荷场的复振幅, K 为位相光栅矢量.在考虑了非线性吸收的动态耦合方程的基础上^[10],引进稳态条件,可进一步推得:

$$\cos\theta \frac{dR}{dz} = -[\alpha_0 + b(RR^* + SS^*)]R - [i \frac{\pi n_0^3 \gamma_{\text{eff}}}{2\lambda} E_1 + bRS^*]S, \quad (1)$$

$$\cos\theta \frac{dS}{dz} = -[\alpha_0 + b(RR^* + SS^*)]S - [i \frac{\pi n_0^3 \gamma_{\text{eff}}}{2\lambda} E_1 + bSR^*]R, \quad (2)$$

$$\left(1 + \frac{E_T + iE_0}{E_q}\right) \frac{E_1}{E_q} = \frac{-E_0 + iE_T}{E_q} \frac{R^* S}{RR^* + SS^*} \quad (3)$$

式中 E_T 为等效扩散场, E_q 最大空间电荷场, E_0 为外加场, γ_{eff} 为有效电光系数, 对 BSO 一般为 γ_{41} , 以上就是一组描述二波相互作用的耦合波方程.

相位光栅是指折射率的空间调制, 而折射率调制是由空间电荷场所产生的. 求解方程(1)~(3), 就可以得到稳态的空间电荷场 E_{sc} 的分布, 如果存在电场等相面的倾斜和弯曲, 必然会引起相位光栅同样的变化. 从物理上来看, 这是一个读、写光以自洽方式同时作用的自衍射过程, 干涉场的空间分布引起折射率变化 Δn 的空间分布, 而 Δn 的空间分布又将导致干涉场光强和相位的重新分布; 如此互相影响以至动态平衡, 最终就导致了光栅等相面的倾斜和弯曲^[11].

所谓相位光栅等相面发生倾斜, 具体就是指当二束相干光对称入射到晶体上时, 等相面法向与晶体表面法向不再正交, 而存在一个偏角 $\Delta\theta_i$ (图 2). 而当发生弯曲时, 指的是等相面本身不再是平面(图 3), 它与 XZ 面的交线也将是曲线, 等相面上不同点的法线方向是不同的, 引入 $\Delta\theta_d$ 表示晶体等相面上各点法向之间的最大偏离角. 如此, 就可用偏离角 $\Delta\theta_i$ 、 $\Delta\theta_d$ 来定量表示空间电荷场的倾斜和弯曲.

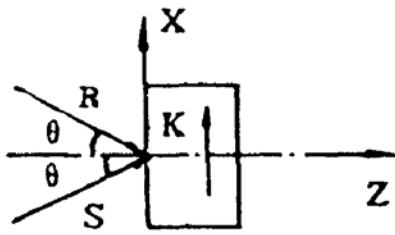


Fig. 1 Beam notation for beam coupling experiment

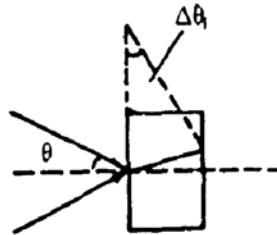


Fig. 2 Inclination

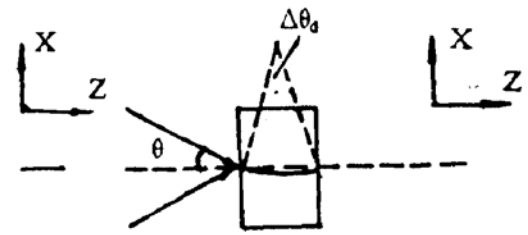


Fig. 3 Dispersion

在四波混频实验中, 对于仅存在倾斜的相位光栅, 会给反向泵浦光产生的衍射光(即通常的相位共轭光)附加上一个 $\Delta\theta_i$ 引起的偏离 ΔK_i , 即引起对相位共轭光的偏转; 对于仅存在弯曲的相位光栅, 则会使不同部位产生的衍射光附加上不同的 ΔK , 使之不再是平行光, 而存在一定的发散度, 这发散度亦可以用 $\Delta\theta_d$ 引起的 ΔK_d 来表示. 实际情况是两类畸变同时存在. 考虑常见的简并四波混频情况(DFWM), 则 $\Delta\theta$ 与 ΔK 等效; 如此, $\Delta\theta_i$ 和 $\Delta\theta_d$ 也就直接定量表示了相位共轭光的偏离和发散(即相位共轭光波前的两类畸变). 显然, 由此引起的相位共轭角分辨率亦可直接用 $\Delta\theta_i$ 和 $\Delta\theta_d$ 来表示.

上述讨论是以两波相互作用时形成的相位光栅来近似描述四波相互作用的情况, 而实际上, 当第三束光(即反向泵浦光)进入晶体后, 会形成一套新的光栅, 叠加在原来的光栅上, 可能使反衬度降低, 影响相位共轭波的衍射效率, 但并不影响原有光栅条纹的形状. 由于关心的是相位光栅的倾斜和弯曲及由此引起的相位共轭波畸变, 故采用此近似.

从方程(1)~(3)可以看出, 空间电荷场 E_1 分别是外加电场 E_0 、晶体厚度 d 、参考光和信号光的比值 R/S 、入射角 θ 、电光系数 γ_{eff} 、吸收系数 α_0 、非线性比例系数 b 和载流子浓度 N_A 的函数. 数值计算可以定量给出等相面倾斜和弯曲对这些实验条件及材料特性的依赖关系.

3 偏离角的计算

首先采用 Runge-Kutta 方法,按不同的实验参数分别求解方程(1)~(3),得到空间电荷场的等相面后,采用四次曲线拟合,再求出等相面的法线方程,由此求得光栅矢量的最大和最小偏向角.

对于 BSO 晶体,计算时按不同条件进行了扫描.图 4 分别是 $\theta = 1^\circ, 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 时的等相面(线).其中坐标轴 X, Z 与图 1 中的几何表示一致,其它条件分别为: $E_0 = 10 \text{ kV/cm}$, $d = 10 \text{ mm}$, $R/S = 100$, $b = 2 \times 10^{-5} (\text{mVcm})^{-1}$, $\alpha_0 = 2.3 \text{ cm}^{-1}$, $\gamma_{41} = 5 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. (若非特别注明,下列计算所取参数与此相同).图 5 是 $\theta = 2^\circ$ 时,不同载流子浓度 N_A 情况下的等相面,图 6、图 7 分别给出了不同 γ_{eff} , E_0 对等相面形状的影响.计算结果表明,不同的 $\alpha_0, b, R/S$ 等几乎对等相面形状不产生影响;而 $\theta, E_0, \gamma_{41}, N_A$ 等则影响较大,尤其是 γ_{eff} .表 1、2、3、4 分别给出了在不同的入射角 θ 、载流子浓度 N_A 、外加电场 E_0 、有效电光系数 γ_{eff} 等情况下,由等相面倾斜和弯曲所产生的四波混频相位共轭波的两类畸变.

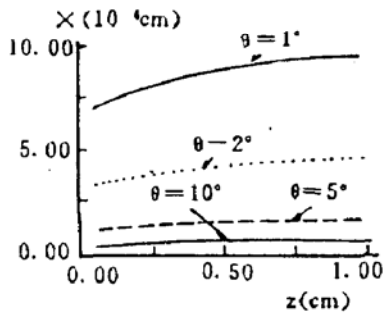


Fig. 4 Equiphase surface at different θ

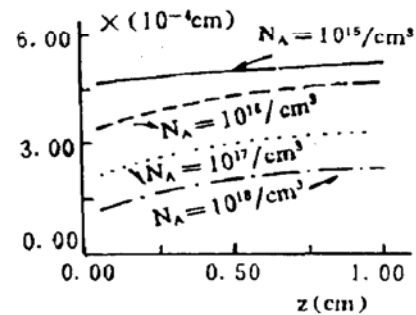


Fig. 5 Equiphase surface at different N_A

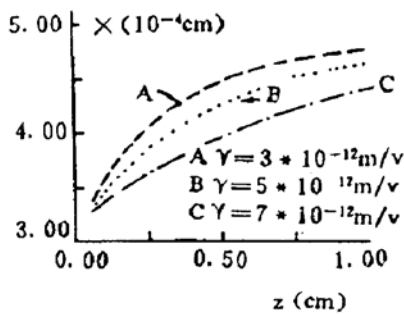


Fig. 6 Equiphase surface at different γ_{eff}

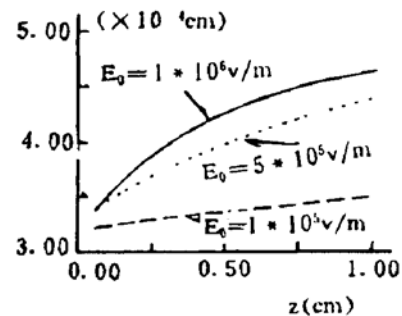


Fig. 7 Equiphase surface at different E_0

四波混频实验中,一般要求正反向泵浦光平行度优于 1×10^{-4} ,故在判断畸变小时,就将 $\Delta\theta$ 与这个量相比较.通过计算发现,当 $\theta = 2^\circ$, $E_0 = 5 \text{ kV/cm}$, $d = 10 \text{ mm}$, $\gamma_{41} = 5 \times 10^{-12} \text{ m/v}$ 时倾斜和弯曲两类畸变分别是 $1.1 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 和 $0.8 \times 10^{-4} \text{ rad}$.随着 θ 的增大, E_0, γ_{41} 的减小,畸变将单调减小,相位共轭的角分辨率也将随之提高,但同时会引起共轭波衍射效率 η 的减小^[12];此外,由于存在吸收,就提高衍射而言, d 有一最佳值^[12],但就畸变(角分辨率)而言, d 却越小越好.如此,在实验中,就需要根据具体要求综合考虑各种因素.值得注意的是还须考虑 N_A 的影响,畸变将随 N_A 的增大而增大,尤其是在离子重掺杂的情况下,其影响更大.

Table 1 Two kinds of distortion in different θ

θ	$\Delta\theta_i$ (10^{-4} rad)	$\Delta\theta_d$ (10^{-4} rad)
1°	3.8	2.8
2°	1.8	1.3
5°	0.3	0.3
10°	0.1	0.1

Table 2 Two kinds of distortion in different N_A

N_A (cm^{-3})	$\Delta\theta_i$ (10^{-4} rad)	$\Delta\theta_d$ (10^{-4} rad)
10^{18}	1.9	1.5
10^{17}	1.9	1.5
10^{16}	1.8	1.3
10^{15}	0.6	0.2

Table 3 Two kinds of distortion in different γ_{eff}

r (10^{12} m/v)	$\Delta\theta_i$ (10^{-4} rad)	$\Delta\theta_d$ (10^{-4} rad)
3	1.2	0.6
5	1.8	1.3
7	3.8	2.2

Table 4 Two kinds of distortion in different E_0

E_0 (10^5 v/m)	$\Delta\theta_i$ (10^{-4} rad)	$\Delta\theta_d$ (10^{-4} rad)
10	1.8	1.3
5	1.1	0.4
1	0.2	0.2

4 结 论

讨论表明,可以通过空间电荷场等相面的倾斜和弯曲来定量表示四波混频相位共轭波的畸变,其大小与实验条件和材料特性有关.结合衍射效率和角分辨率,发现 θ , E_0 , d , γ_{eff} 等对两者的影响互为制约,这就意味着在实验中,应综合考虑各种具体要求,合理选取参数.

参 考 文 献

- [1] A. A. Shkin, G. D. Boyed, J. M. Dziedzic *et al.*, Optically induced refractive index inhomogeneities in LiNbO_3 and LiTaO_3 . *Appl. Phys. Lett.* 1966, **9**(1):72~74
- [2] R. L. Townsend, J. T. LaMacchia, Optically induced refractive index changes in BaTiO_3 . *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(3):5188~5191
- [3] J. P. Huignard, F. Micheron, High sensitivity read-write volume holographic storage in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ crystals. *Appl. Phys. Lett.* 1976, **29**(9):591~593
- [4] T. Minemoto, S. Numata, K. Miyamoto, Optical parallel logic gate using spatial light modulators with the Pockels effect: implementation using three PROM devices. *Appl. Opt.* 1986, **25**(6):948~951
- [5] P. Yeh, Fundamental limit of the speed of photorefractive effect and its impact on device applications and material research. *Appl. Opt.* 1987, **26**(4):602
- [6] N. V. Kukhtarev, V. B. Maukov, S. G. Odulov *et al.*, Holographic storage in electrooptic crystals. I. steady state. *Ferroelectrics*, 1979, **22**(3~4):949
- [7] J. M. Heaton, L. Solymar, Transient energy transfer during hologram formation in photorefractive crystals. *Opt. Acta*, 1985, **32**(4):397
- [8] 严媛, 乌蔚曙, 陈英礼等, BSO 晶体中的两波相互作用. *光学学报*, 1986, **6**(11):981~987
- [9] Yan Yuan, Wu Weishu, Chen Yinli, Formation of amplitude grating in real-time holographic recording medium

BSO crystal. *Proc. SPIE*, 1986, **673**:451~454.

- [10] 严瑗, 杨帆, 徐乃庄等, 光致折射效应中空间电荷场建立过程的研究. *光学学报*, 1991, **11**(2):156~160
- [11] P. Gunter. Holograph, Coherent light amplification and optical phase conjugation with photorefractive materials. *Phys. Report.*, 1982, **93**(4):244
- [12] Marvin J. Weber, *CRC Handbook of Laser Science & Technology*. Florida, U. S. A. : CRC Press, Inc. Boca Raton, 1982, **4**:349~382

The effect of equiphase-surface distortion on the wave-front of photorefractive phase conjugate wave

YAN Yuan ZHU Wenyong SUN Hong XU Naizhuang

(Dept. of Appl. Phys., Shanghai Jiaotong Univs., Shanghai 200030)

(Received 19 February 1992; revised 5 May 1992)

Abstract

Using two beam-coupling equations to describe space-charge field, we investigated the inclination and the bent of the equiphase surface, which would cause two kinds of wave-front distortion of phase conjugate wave in four-wave mixing (FWM). The qualitative method describing the distortion was obtained. Through numerical calculation, the effects of varied experimental parameters were presented. The length of the crystal and the applied electric field, which were related to the diffraction efficiency and the resolving power were also discussed.

Key words phase conjugate, wave-front distortion, space-charge field, equiphase surface.