

# 外电场对 SBN :Cr 晶体二波耦合特性的影响及应用<sup>\*</sup>

赵建林<sup>†</sup> 李振伟 杨德兴 马仰华 杨东升

(西北工业大学应用物理系, 西安 710072)

(2003 年 8 月 4 日收到, 2003 年 10 月 24 日收到修改稿)

对固液同成分 SBN :Cr( $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ :Cr)晶体在外加直流电场作用下的光折变二波耦合特性及其应用进行了实验研究,分析了晶体的二波耦合强度增益系数随外电场变化的趋势,并给出了实验测量结果.发现在适当的外电场作用下,晶体的光折变二波耦合增益和响应速度可以得到一定程度的提高.进一步的研究表明,这种电场响应特性有助于改善 SBN :Cr 晶体的某些应用性能.利用该晶体通过光折变二波耦合非线性放大原理实现光学图像边沿增强时,通过给晶体沿轴向施加适当的外电场,可进一步提高图像边沿增强效果.在基于光折变边沿增强预处理的联合变换相关器中,适当的外加电场可进一步改善联合变换相关器的相关识别性能.

关键词: SBN :Cr 晶体, 光折变二波耦合, 边沿增强, 联合变换相关器

PACC: 4265, 4230

## 1. 引 言

由于外加直流电场能够显著地改变某些光折变材料的性能,研究这些材料的电场响应特性就尤为重要.光折变过程中,外电场通过影响载流子的漂移,改变晶体内部的空间电荷场,从而改变材料的光折变响应特性.迄今,人们已经进行了大量的相关研究,其中包括电场对衍射效率<sup>[1,2]</sup>、光折变响应时间<sup>[3]</sup>、光感应光散射<sup>[4]</sup>以及波耦合特性<sup>[5-7]</sup>等的影响.光折变晶体的电场响应特性拓展了其应用,如光学分层存储<sup>[8]</sup>、晶体存储容量的增大<sup>[9]</sup>,以及定影光栅的全息再现增强<sup>[10]</sup>等,都得益于外电场的存在.

固液同成分的 SBN :Cr( $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ :Cr)晶体是一种在红光区具有较高光折变灵敏度和快速响应的优质光折变材料.其在 He-Ne 激光照射下的光折变二波耦合非线性能量转移特性<sup>[11]</sup>、四波混频相位共轭反射特性<sup>[12]</sup>,以及基于二波耦合非线性放大原理的光学图像边沿增强特性<sup>[13]</sup>和基于边沿增强预处理的联合变换相关器<sup>[14]</sup>等,已先后有了报道.进一步的实验研究发现,外加适当的直流电场于 SBN :Cr 晶体上时,与没有外电场作用时相比,晶体的二波耦合增益可以得到一定的提高.故可以通过

在晶体轴向施加适当的外电场,进一步改善基于光折变二波耦合的图像边沿增强效果,以及基于光折变边沿增强预处理的联合变换相关器的相关识别性能.本文报道关于 SBN :Cr 晶体在外加直流电场作用下的光折变二波耦合特性及其在改善光学图像边沿增强和联合变换相关器的相关识别性能等方面应用研究的实验结果.

## 2. 外电场对光折变二波耦合增益系数的影响

光折变二波耦合过程中,两束相干光在晶体中交叠产生强度非均匀分布的干涉光场.该光场通过光电效应在晶体中激发出载流子,载流子在导带中因扩散(或)漂移最后在暗区被重新俘获,形成与光强空间分布相对应的空间电荷分布,再进一步按照泊松方程产生相应的空间电荷场.电场的分布改变了晶体的晶格结构,从而形成空间调制的折射率栅.这种折射率栅相对于干涉条纹强度分布存在一定的空间相移,由此引起一束光到另外一束光的能量不可逆转移.这种二波耦合过程的强度增益系数可表示为<sup>[14,15]</sup>

$$\Gamma = \frac{\pi n_i^3 r_{\text{eff}}}{\lambda \cos \theta_i} |E_{\text{sc}}| \sin \Phi, \quad (1)$$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 60077018)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: jljzhao@nwpu.edu.cn

式中  $n_i$  为晶体的折射率,  $r_{\text{eff}}$  为晶体的有效电光系数,  $\lambda$  为入射光波长,  $2\theta_i$  为两耦合光波在晶体内的夹角,  $|E_{\text{SC}}|$  为空间电荷场强度,  $\Phi$  为折射率栅相对于干涉条纹强度分布的空间相移.  $|E_{\text{SC}}|$  和  $\Phi$  与外电场之间存在如下依赖关系:

$$|E_{\text{SC}}| = mE_s \sqrt{\frac{E_0^2 + E_D^2}{(E_D + E_s)^2 + E_0^2}}, \quad (2)$$

$$\tan\Phi = \frac{E_0^2 + E_D^2 + E_D E_s}{E_0 E_s}, \quad (3)$$

式中  $E_s = qN_A/\epsilon K$  为饱和空间电荷场,  $E_D = k_B TK/q$  为扩散场,  $K$  为干涉光场的光栅波矢大小,  $N_A$  为稳态情况下的平均受主密度,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $q$  为电荷电量,  $T$  为绝对温度,  $m$  为干涉光场调制度,  $E_0$  为外电场沿光栅波矢方向的分量.  $|E_{\text{SC}}|$  在  $E_0 = 0$  到  $E_0 \rightarrow \infty$  之间的取值为

$$\frac{mE_s}{1 + E_s/E_D} \Big|_{E_0=0} \leq |E_{\text{SC}}| < mE_s \Big|_{E_0 \rightarrow \infty}. \quad (4)$$

可见, 晶体中的空间电荷场  $|E_{\text{SC}}|$  将随外电场  $E_0$  的增大而增大, 而相移量  $\Phi$  与  $E_0$  的关系则比较复杂. 尽管如此, 由于  $\Gamma \propto |E_{\text{SC}}| \sin\Phi$ , 故在一定的双光束夹角下, 晶体的强度耦合增益  $\Gamma$  与外电场  $E_0$  之间存在一定的依赖关系.

实验采用典型的前向二波耦合光路. 如图 1 所示,  $I_s$  和  $I_p$  分别为信号光和抽运光, 外加直流电场的正方向沿光轴正方向(极化方向). 所用晶体样品为经单畴化的固液同成分 SBN :Cr ( $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ :Cr) 晶体, 晶体尺寸为  $6.6\text{mm} \times 6.7\text{mm} \times 5.5\text{mm}$ , 掺 Cr 浓度为 1000ppm, 由 Osnabrück 大学物理系晶体生长实验室提供. 采用 He-Ne 激光器作为照明光源, 输出功率为 35mW, 波长为 633nm, 取抽运光与信号光强度之比  $r = 15$ . 实验中选取两耦合光波在晶体外部夹角为  $16^\circ$ , 接近于晶体的最佳耦合角<sup>[11]</sup>, 且为对称入射, 两光束的偏振面均平行于晶体光轴(异常光).

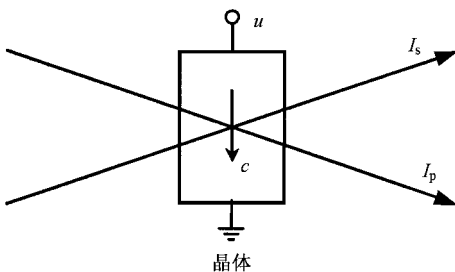


图 1 光折变二波耦合实验光路布置

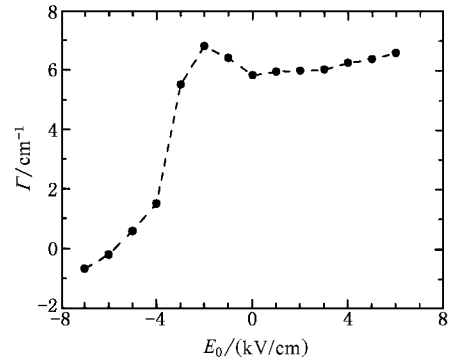


图 2 SBN :Cr 晶体二波耦合强度增益系数随外电场的变化

图 2 为实验测得的二波耦合强度增益系数  $\Gamma$  与外电场  $E_0$  的关系曲线, 其中  $\Gamma$  由下式得出<sup>[15]</sup>:

$$\Gamma = \frac{1}{L} \ln \frac{I_{i0} I_s(L)}{I_{s0} I_p(L)}, \quad (5)$$

式中  $I_{i0}$  ( $i = s, p$ ) 和  $I_i(L)$  分别为晶体样品前后表面处的入射和出射光强度,  $L$  为双光束在晶体中的有效作用距离. 从图 2 可以看出, 与未加外电场相比, 正向外电场能够适当地提高晶体的二波耦合增益. 施加负向外电场时, 随电场强度的增大, 增益系数先是增大, 在  $-2\text{kV/cm}$  时达到最大值, 其后便急剧减小, 直至  $-6\text{kV/cm}$  以上时变为负值.  $\Gamma$  出现负值意味着此时两耦合光波的能量转移方向发生了逆转, 即改为由信号光向抽运光转移.

此外, 实验过程中对二波耦合时间响应常数的测量结果显示, 外电场也能够提高晶体的响应速度, 这显然是外电场加速了光致载流子的漂移所致. 在本文所给实验条件下, 其响应时间由无外电场时的  $0.8\text{s}$  减小到  $4\text{kV/cm}$  时的约  $0.3\text{s}$ .

### 3. 外电场对光折变二波耦合图像边沿增强效果的改善

文献 [13] 中曾报道, 利用晶体的二波耦合非线性能量转移特性, 可以实现光学图像的边沿增强. 本文进一步比较了 SBN :Cr 晶体在不同外电场作用下, 通过二波耦合非线性能量转移特性实现光学图像边沿增强的效果. 光路布置如图 3 所示, 信号光束经扩束准直后加入图像信息, 并使其傅里叶频谱与抽运光在晶体位置相交, 输出图像由面阵 CCD 接收. 晶体光轴水平放置, 外电场的正方向沿光轴正方向(图 3 中  $c$  方向). 实验过程中, He-Ne 激光器输出功率为 35mW, 取抽运光与信号光强度比  $r = 17$ , 两光束夹角为  $15.7^\circ$ . 图 4 为相应的实验结果. 图 4(a)

为未加抽运光时的输出像.图 4 (b)为加入抽运光后的稳态输出像.图 4 (c)为加入抽运光并施加 5kV/cm 直流电场时的稳态输出像.图 5 示出输出图像沿横向的灰度分布(图 4 中亮线标注处).可以看出,加入抽运光后,输出图像边沿的灰度级相比无抽运光时提高了一倍以上,而中间的灰度级提高幅度很小.施加 5kV/cm 直流电场时,输出图像的边沿进一步增强,灰度级提高了两倍以上.表明施加适当的外电场,提高了二波耦合的增益系数,相应地,也提高了图像边沿增强的效果.但从图像边沿灰度级的增加幅度看,外电场作用下边沿增强的效果,并不仅仅是二波耦合增益系数的贡献,因为图 2 所示外电场对提高二波耦合强度增益的贡献是有限的.合理的解释是,外电场的引入,不仅提高了二波耦合强度增益,也导致 SBN :Cr 晶体中光照区域折射率变化增大,从而提高了相位栅的调制度,并进而提高了高频成分的衍射效率.对外电场作用下 SBN :Cr 晶体光致折射率变化的实验测量结果<sup>[16]</sup>已证实了这一点.

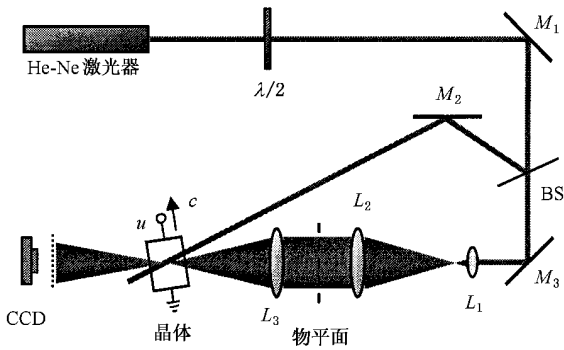


图 3 基于光折变二波耦合图像边沿增强实验光路图  $M_1, M_2, M_3$  为反射镜,BS 为分束镜,透镜  $L_1$  与  $L_2$  构成扩束准直系统, $\lambda/2$ 波片用于将光束偏振面由垂直方向调至水平方向

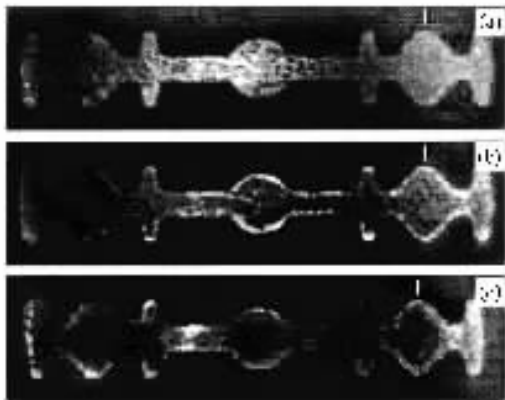


图 4 基于二波耦合的图像边沿增强输出结果 (a)为未加抽运光 (b)为加入抽运光 (c)为加入抽运光及 5kV/cm 外电场

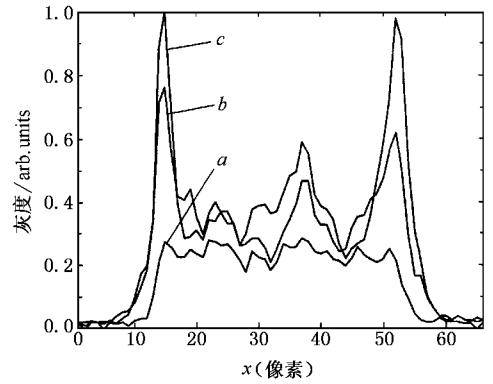


图 5 经边沿增强处理后图像的归一化强度分布 曲线 a—c 同图 4 (a)—(c)

需要指出的是,虽然增大外电场的强度能够进一步提高晶体的光折变二波耦合增益,并改善图像边沿增强的效果,但在实验中发现,随电场强度的增大,光束的散射也随之增强,导致输出图像出现弥散<sup>[17]</sup>.因此,电场强度大小的选择需要在具体的实验条件下确定.

### 4. 外电场对光折变边沿增强联合变换相关器的改善

文献 [14] 曾报道利用光折变二波耦合边沿增强预处理可以提高联合变换相关器的相关识别效果.本文进一步研究了外电场作用下光折变边沿增强联合变换相关器的输出特性.图 6 示出实验采用的光折变边沿增强联合变换功率谱记录光路.与图 3 光路不同的是,为使联合变换频谱扩展得足够开,以满足后面所用液晶光阀的空间分辨率要求,实验中用成像透镜  $L_4$  和显微物镜  $L_5$  将经晶体调制的联合变换功率谱成放大像于 CCD 光敏面.为简单起见,实验中取参考图像与目标图像为两个大小等于  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$  的正方形,两者中心间距为 8mm.所用 He-Ne 激光器的输出功率仍为 35mW,抽运光与信号光强度之比  $r = 110$ ,两光束在晶体外的耦合角度为  $15.7^\circ$ .图 7 示出联合变换功率谱的读出光路.由图 6 光路记录的联合变换功率谱输出到阴极射线管耦合液晶光阀 CRT-LCLV 上,再由准直的 He-Ne 激光束读出,并经透镜  $L_3$  作傅里叶变换,相关输出图样投射到 CCD 光敏面上.所用 CRT 的分辨率为  $800 \times 600$  像素,LCLV 的分辨率为 40lp/mm.

分别观察了无抽运光和外电场、有抽运光无外电场、有抽运光和外电场三种情况下的联合变换相关输出结果.图 8 示出得到的联合变换功率谱和相关输出图样.图 9 示出相应的相关输出图样沿横向的灰度分布.可以看出,未加入抽运光时,联合变换功率谱高频分量太弱,甚至淹没在噪声之中,因此几乎看不到  $\pm 1$  级相关峰.加入抽运光后,由于参考图像与待识别目标图像的边沿得到增强,联合变换功率谱高频分量也得到提高,出现了  $\pm 1$  级相关峰.施加  $5\text{kV}/\text{cm}$  直流电场后,联合变换功率谱的高频分量得到了进一步改善,其  $\pm 1$  级相关峰明显提高,灰度级从无外电场时的 120 提高到 240,而且相关峰的半高宽也有所减小,说明相关识别性能得到了有效的改善.

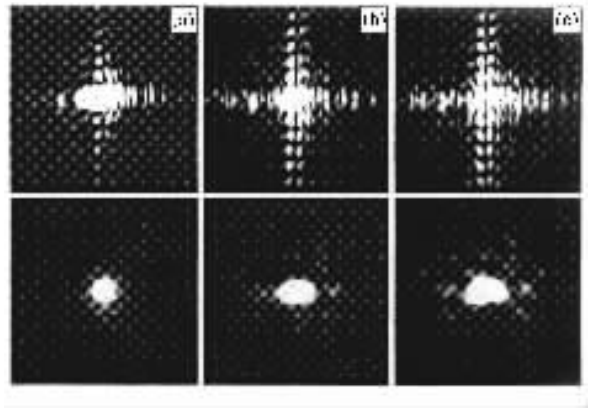


图 8 联合变换功率谱及相关输出结果 图注同图 4

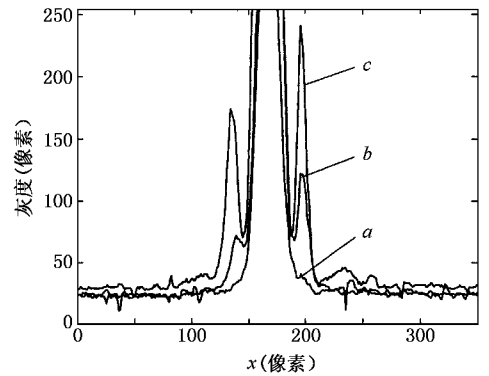


图 9 相关峰沿横向的灰度分布 曲线 a—c 同图 4(a)—(c)

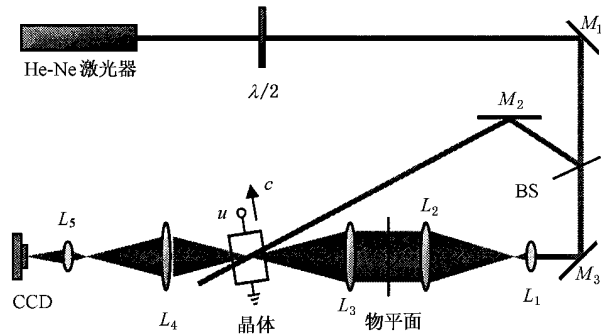


图 6 光折变边沿增强联合变换功率谱记录光路图

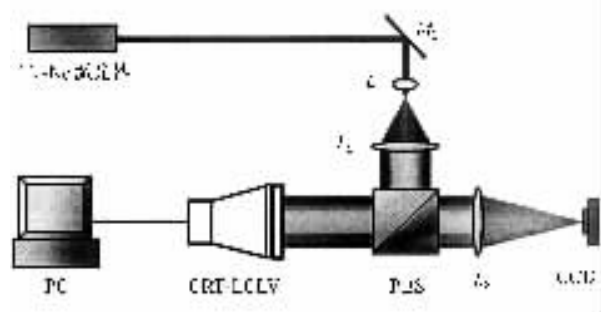


图 7 联合变换功率谱读出光路图  $L_1, L_2$  构成扩束准直系统, PBS 为偏振分光棱镜

### 5. 结 论

本文讨论了 SBN :Cr 晶体在外加直流电场作用下的光折变二波耦合特性,及其在图像边沿增强和联合变换相关识别器中的应用.实验结果和理论分析均显示,外加适当的电场于 SBN :Cr 晶体上时,其二波耦合增益可以得到适当提高,同时响应速度也有一定程度的提高.SBN :Cr 晶体的这一电场响应特性有助于改善其实际应用性能.利用该晶体通过光折变二波耦合非线性放大原理实现光学图像边沿增强时,通过给晶体沿轴向施加适当的外电场,可进一步提高图像边沿增强效果,在基于光折变边沿增强预处理的联合变换相关器中,适当的外加电场可进一步改善联合变换相关器的相关识别性能.

[ 1 ] Vre R D *et al* 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 600  
 [ 2 ] Knyaz 'kov A *et al* 1985 *Sov. Phys. Tech. Phys.* **29** 801  
 [ 3 ] Jonathan J M C *et al* 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-22** 1936

[ 4 ] Clark III W W *et al* 1990 *Appl. Opt.* **29** 1249  
 [ 5 ] Ma J *et al* 1988 *Appl. Phys. Lett.* **53** 826  
 [ 6 ] Sayano K *et al* 1990 *J. Appl. Phys.* **67** 1594

- [ 7 ] Shumelyuk A *et al* 2001 *Appl. Phys. B* **72** 707  
 [ 8 ] Thaxter J B *et al* 1974 *Appl. Opt.* **13** 913  
 [ 9 ] Redfield S *et al* 1988 *Opt. Lett.* **13** 880  
 [ 10 ] Ford J E *et al* 1992 *J. Opt. Soc. Am. A* **9** 1183  
 [ 11 ] Zhao J L *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 739  
 [ 12 ] Yang D S *et al* 2002 *Acta Photon. Sin.* **31** 1160 [ in Chinese ] 杨东升等 2002 光子学报 **31** 1160 ]  
 [ 13 ] Zhao J L *et al* 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 1343 [ in Chinese ] 赵建林等 2001 光学学报 **21** 1343 ]  
 [ 14 ] Zhao J L *et al* 2002 *Opt. Commun.* **212** 287  
 [ 15 ] Liu *et al* 1992 *Photorefractive Nonlinear Optics* ( Beijing : Stantard Press of China ) p10—33 [ in Chinese ] 刘思敏等 1992 光折变非线性光学 ( 北京 : 中国标准出版社 ) 第 10—32 页 ]  
 [ 16 ] Zhao J L *et al* 2003 *Acta Photon. Sin.* **32** 1487 [ in Chinese ] 赵建林等 2003 光子学报 **32** 1487 ]  
 [ 17 ] Zhao J L *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1464

## Influence of external electric field on photorefractive two-wave coupling in SBN :Cr crystal and its applications<sup>\*</sup>

Zhao Jian-Lin<sup>†</sup> Li Zhen-Wei Yang De-Xing Ma Yang-Hua Yang Dong-Sheng

( Department of Applied Physics , Northwestern Polytechnical University , Xi 'an 710072 , China )

( Received 4 August 2003 ; revised manuscript received 24 October 2003 )

### Abstract

The properties and applications of the photorefractive two-wave coupling in congruent SBN :Cr (  $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$  :Cr ) crystal under external dc electric field are experimentally investigated in this paper. The variation of the intensity gain coefficient of the two-wave coupling with the external field is analyzed , and the measurement results are presented. It is found that the photorefractive two-wave coupling gain and response rapidity can be both increased by applying appropriate external electric field to the crystal. Further study indicates this electric response property of SBN :Cr crystal is useful to some applications , such as improving the image edge-enhancement and the image edge-enhancement joint-transform correlator based on the nonlinear energy transfer of photorefractive two-wave coupling in the crystal.

**Keywords** : SBN :Cr crystal , photorefractive two-wave coupling , edge-enhancement , joint-transform correlator

**PACC** : 4265 , 4230

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60077018 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : jlzha@nwpu.edu.cn