

# KNSBN:Co 晶体自泵浦位相共轲 特性的研究\*

余有龙 姜作宏 高 军 王 然

(黑龙江大学物理系, 哈尔滨 150080)

姜全忠 孙大亮 陈焕鑫

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

## 提 要

本文报道在两块不同尺寸的 KNSBN:Co 晶体中实现了自泵浦位相共轲输出, 通过实验验证了位相共轲反射率与入射角、入射位置以及波长有关, 并给出各自的实验曲线. 保持激光器工作波长为 514.5 nm 不变, 在大块晶体中可得到高达 73.0% 的位相共轲反射率. [文章还给出共轲光的形成时间随系统光强变化关系的实验曲线, 并指出自泵浦形成时透射光强和晶体表面反射光强的时间变化特性, 解释了自泵浦形成的阈值特性.

关键词 KNSBN:Co 晶体, 自泵浦, 位相共轲.

## 1 引 言

简并四波混频(DFWM)位相共轲技术不仅具有实时处理能力, 而且在光学信息处理方面具有重要的作用<sup>[1~4]</sup>, 1982年 Feinberg<sup>[5]</sup>将单束光射入钛酸钡晶体, 利用晶体中折射光的散射光通过相邻晶面的全内反射来充当传统简并四波混频法实现光学位相共轲所需的一对相向泵浦光, 实现了位相共轲输出, 这一现象称之为全内反射光学自泵浦位相共轲, 简称为自泵浦. 这一技术的实现把位相共轲技术的意义推向新的高度, 它不仅有利于光学器件的集成, 并对光学处理器和未来光计算机的实现提供新的途径, 而且能避免因过多光学元件的引入而引起的畸变, 因此它受到人们的普遍关注<sup>[6~10]</sup>.

本文报道了在两块同掺杂浓度不同尺寸掺钴钾钠铌酸锶钡(KNSBN:Co)晶体中实现自泵浦位相共轲输出, 分析了晶体尺寸对位相共轲反射率的影响.

## 2 自泵浦位相共轲理论

大家知道光束射入单晶时由于晶体不均匀性导致散射, 折射光与散射光耦合形成折射率调制的位相型体光栅, 从而引起自衍射并导致能量转移, 使得散射光得以加强. 双区域耦合理论<sup>[11]</sup>认为, 形成自泵浦的晶体中存在两个区域, 一个区域的部分散射光通过晶面全内

收稿日期: 1991年10月16日; 收到修改稿日期: 1991年12月9日

\* 本课题得到黑龙江省自然科学基金的支持.

反射达到另一区域而构成光环,并与该区域的散射光一起形成一对相向的泵浦光,它们与折射光一起满足形成简并四波混频所需的条件,这样并存的两个区域各自形成一个简并四波混频,它们总的输出就构成位相共轭输出.文献[11]给出晶体自泵浦位相共轭反射率  $R$  的表达式为:

$$R = -a(r)b(r) / [4(1-r^2)\tanh^4(\gamma lr/2)], \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} a(r) &= r^2 [1 - \tanh^2(\gamma lr/2)]^2, \\ b(r) &= [r - 2 \tanh(\gamma lr/2)]^2 - r^2 \tanh^2(\gamma lr/2), \\ \gamma &= \omega r_{\text{eff}} E / \{2nc \cos[(\alpha_1 - \alpha_2)/2]\}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

这里  $r$  为取决于光强的参数,  $\gamma l$  为耦合强度,  $l$  为靠近入射表面的第一个区域的尺寸,  $n$  为折射率,  $c$  为光速,  $E$  为电场强度,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为晶体中折射光和散射光与  $c$  轴方向的夹角,若设两束光的偏振矢量分别为  $\mathbf{e}_1$  和  $\mathbf{e}_2$ , 则没有外电场时

$$E = (k_B T / e) \{k_g / [1 + (k_g/k_0)^2]\} (\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2^*) \quad (3)$$

这里  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $k_0$  为取决于载流子密度的参数,  $k_g$  为光栅波矢的数量值.它等于  $2(n\omega/c)\sin[(\alpha_1 - \alpha_2)/2]$ , 对非常光来说

$$r_{\text{eff}} = [n_0^4 r_{13} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + 2n_e^2 n_0^2 r_{42} \cos^2[(\alpha_1 + \alpha_2)/2] + n_e^4 r_{33} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2] \sin[(\alpha_1 + \alpha_2)/2], \quad (4)$$

$$- \cos \alpha_1 = \sin \theta / n, \quad (5)$$

可见  $R$  值不仅取决于区域尺寸  $l$ , 而且与入射角  $\theta$  有关.

### 3 实验与结果分析

实验采用图 1 所示装置来测试晶体自泵浦位相共轭的各参数,  $I_s$  为入射光强,  $I'$ 、 $I_R$  分别为系统光强  $I$  和共轭光强  $I_R$  经分束器  $BS$  后各自的反射光强,  $\theta$  为入射角,  $x$  为入射位置, 位相共轭反射率

$$R = I_R / I_s. \quad (6)$$

若设某位置分束器透射率为  $T$ , 考虑  $I_s = IT$ , 则

$$R = I_R' / (I'T). \quad (7)$$

氩离子激光器工作波长为 514.5 nm, ND 为衰减器, 它一方面用来改变系统的入射光强, 另一方面可削弱位相共轭光在晶体和激光器端镜间的振荡, 从而保证系统光强相对稳定,  $IR$  为可变光阑. 所使用的钨青铜族  $\text{Ba}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{K}_{0.75}\text{Na}_{0.25}\text{Nb}_5\text{O}_{15}$  掺  $\text{Co}^{2+}$  晶体(缩写为 KNSBN:Co)是利用 Czochralski 生长技术通过提拉法得到的, 两块极化了的单畴 KNSBN:Co 晶体的尺寸分别为  $5.80 \text{ mm} \times 4.75 \text{ mm} \times 5.15 \text{ mm}$  和  $6.54 \text{ mm} \times 4.52 \text{ mm} \times 4.08 \text{ mm}$ , 大块晶体  $c$  轴平行于 5.15 mm 的棱, 小块晶体的  $c$  轴则平行于 4.08 mm 的棱. 二者钴离子所占重量比皆为 0.07%.

#### 3.1 自泵浦位相共轭反射率随入射角和入射位置的关系

实验中我们观察到两块晶体的位相共轭反射率  $R$  随入射角  $\theta$  和入射位置  $x$  变化而变化. 其变化关系的实验曲线分别如图 2、图 3 所示. 造成  $R$  随  $\theta$  和  $x$  变化而变化的原因是:

1)  $\theta$  下变时改变入射位置  $x$ , 一方面会改变区域中心到晶体表面的距离, 通过改变两区域间

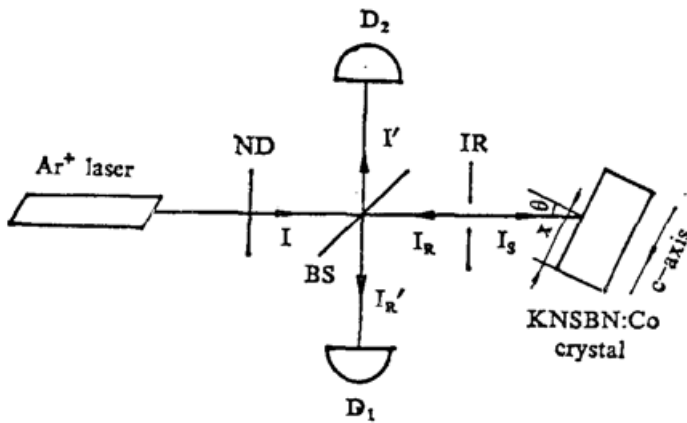


Fig. 1 Experimental set-up for self-pumped phase conjugation and the measurement of phase conjugate reflectivity  $R$

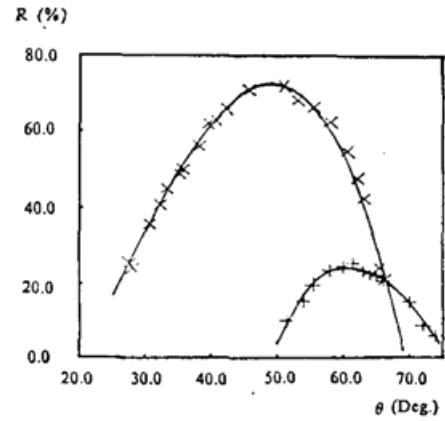


Fig. 2 The dependence of phase conjugate reflectivity  $R$  on incident angle  $\theta$ .  $I_s$  is  $1.26 \text{ W/cm}^2$ ,  $x$  is  $2.80 \text{ mm}$ . ( $\times$ , large crystal;  $+$ , small crystal.)

形成的光环宽度从而影响  $l$  值, 以致于影响自泵浦位相共轭输出, 另一方面改变光环长度, 通过晶体对泵浦光吸收量大小的影响从而改变位相共轭输出; 2)  $x$  不变时改变入射角  $\theta$ , 它会影响到各区域中构成光环的散射光与折射光间夹角, 一方面它会影响到区域尺寸  $l$ , 另一方面由于二波耦合增益系数与角度有关, 造成散射光输出为一强度分布不均匀的扇斑, 只有选择适当的入射角扇斑中能量较强的部分才能被用来形成自泵浦<sup>[9]</sup>, 并且具有较大的  $l$  值, 它对应较强的共轭输出。可见只有入射角和入射位置处于一定值时才能获得较大的位相共轭反射率。对于尺寸不同的晶体其最佳入射位置和最佳入射角有些差异, 这正是  $R$  对区域尺寸  $l$  以及角度依赖性的结果。造成大块晶体有较高反射率的原因有二: (1) 有较大的耦合区域; (2) 折射光与散射光耦合时耦合程度较强方向的散射光对自泵浦的形成能够起到作用。可以认为尺寸太大会降低反射率, 因为增大尺寸的同时也增强了吸收。

### 3.2 位相共轭形成时间与系统光强的关系

保持入射角和入射位置不变, 改变系统光强  $I$ , 实验表明随着光强的减弱, 形成时间  $\tau$  变长, 低于某一光强时  $\tau$  趋于无穷大, 称该强度为阈值强度。两块晶体的阈值强度为大块对应  $I_{s\text{th}} = 20.0 \text{ mW/cm}^2$  ( $\theta = 50.0^\circ$ ,  $x = 2.20 \text{ mm}$ ), 小块对应  $I_{s\text{th}} = 10.0 \text{ mW/cm}^2$  ( $\theta = 60.0^\circ$ ,  $x = 2.50 \text{ mm}$ )。造成这种现象的原因是由于低于该强度时入射光的散射光强不足以克服两区域间环路的吸收。不同组分、不同掺杂、掺杂量的大小等通过改变吸收系数的大小而影响阈值, 改变晶体尺寸的相对大小则可以通过影响吸收量的多少而改变阈值。图 4 为大块晶体自泵浦形成时间随光强变化关系曲线, 可见增大入射光强可以提高晶体响应速度。

### 3.3 透射光强和晶体表面的反射光强的时间变化特性

在自泵浦的形成过程中, 实验发现透射光强度  $I_t$  和晶体表面的反射光强  $I_r'$  随时间变化而改变。大块晶体二者的时间变化关系实验曲线见图 5 所示, 由图可见整个过程可分为两阶段。第一阶段从  $t = 0 \text{ s}$  到  $t = 10 \text{ s}$ , 这个过程中出现散射和能量转移现象。能量转移造成晶体表面附近光强减小, 从而减小  $I_t$ 、 $I_r'$ 。随着能量转移程度的加深, 环路方向散射光强足以克服环路中的吸收从一区域达另一区域, 形成自泵浦输出并很快进入稳定状态, 这便是始于  $t = 10 \text{ s}$  的第二阶段, 大量的能量被用来形成自泵浦, 这导致  $I_t$ 、 $I_r'$  的锐减最后趋于稳定值。

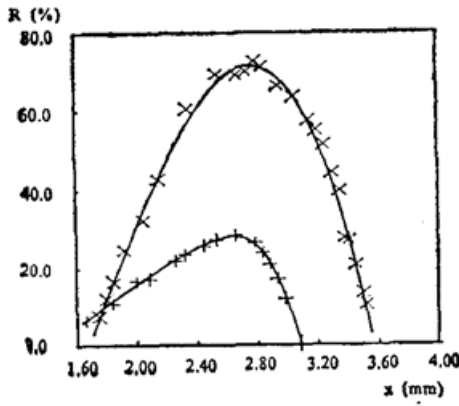


Fig. 3 The dependence of phase conjugate reflectivity  $R$  on incident position  $x$ .  
 $I_s$  is about  $0.6 \text{ W/cm}^2$ ,  $\theta$  is  $48.0^\circ$   
 ( $\times$ , large crystal,  $+$ , small crystal.)

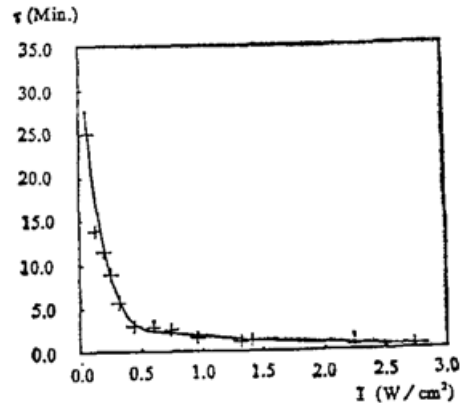


Fig. 4 Experimental plot of the formation time of SPPC vs the input intensity in large crystal.  
 $\theta$  is  $46.5^\circ$ ,  $x$  is  $2.40 \text{ mm}$  and the reflectivity of BS is  $40\%$ .

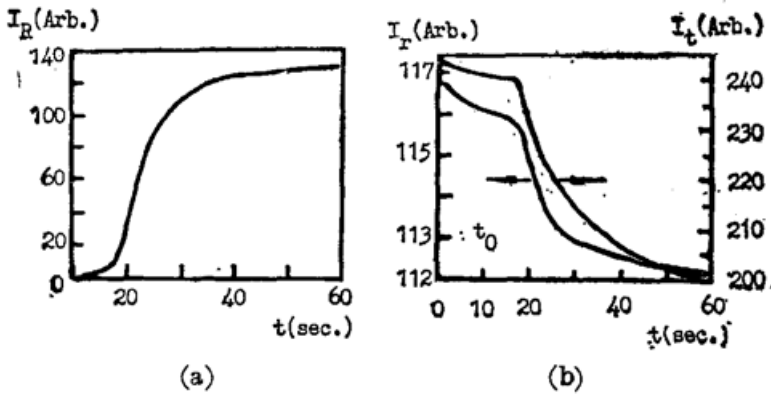


Fig. 5 Time dependence of intensities in SPPC  
 (a) Time dependence of phase conjugate output.  
 (b) Time dependence of transmitted beam and reflected beam from the first surface of the large crystal ( $t_0=10\text{s}$ )

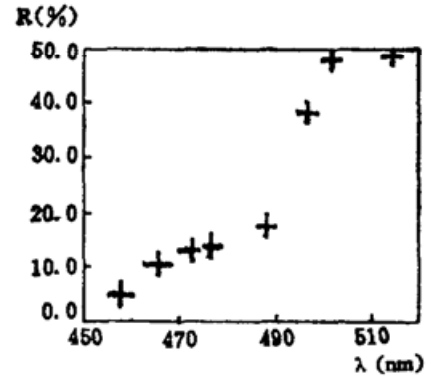


Fig. 6 Experimental data of the large crystal on the phase conjugate reflectivity  $R$  as a function of wavelength.  
 $I_s=635 \text{ mW/cm}^2$ ,  $\theta=55^\circ$ ,  $x=2.30 \text{ mm}$

### 3.4 位相共轭反射率与激光器工作波长的关系

图 6 反映了位相共轭反射率对激光器工作波长的依赖性, 可见在氩离子激光器的几个波长中,  $\lambda=514.5 \text{ nm}$  对应最大的位相共轭反射率. 这种现象的原因是由于晶体对波长的敏感性而造成的.

## 4 结 论

KNSBN:Co 晶体具有很高的自泵浦位相共轭反射率, 并且反射率的大小与入射角、入射位置有关, 大块晶体最佳入射角为  $\theta=50.5^\circ$ , 入射位置为  $x=2.80 \text{ mm}$ , 小块晶体最佳入射角为  $\theta=61.5^\circ$ , 入射位置为  $x=2.62 \text{ mm}$ . 只有高于阈值强度的入射光才能形成自泵浦输出, 增大入射光强会缩短自泵浦形成时间. 自泵浦形成过程中透射光强和晶体表面的反射光强随时间变化而减弱, 并逐渐趋于稳定值. 另外位相共轭反射率与激光器工作波长有关. 氩离子激光器的  $514.5 \text{ nm}$  波长有较高的位相共轭反射率.

## 参 考 文 献

- [1] J. O. White, A. Yariv, Real-time image processing via four-wave mixing in a photorefractive medium. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37** (1): 5~7
- [2] Y. H. Ja, Real-time image subtraction in four-wave mixing with photorefractive  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  crystals. *Opt. Commun.*, 1982, **42** (6): 377~380
- [3] Y. H. Ja, Real-time image division in four-wave mixing with photorefractive  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  crystals. *Opt. Commun.*, 1982, **44** (1): 24~28
- [4] Y. H. Ja, Real-time double-exposure holographic interferometry in four-wave mixing with photorefractive  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  crystals. *Appl. Opt.*, 1982, **21** (18): 3230~3231
- [5] J. Feinberg, Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection. *Opt. Lett.*, 1982, **7** (10): 486~488
- [6] 余有龙, 许克彬, 徐海英等. 自泵浦位相共轭反射的实验研究. *光学学报*, 1991, **11** (11): 995~999
- [7] S. K. Kwong and A. Yariv, Bistable oscillations with a self-pumped phase-conjugate mirror. *Opt. Lett.* 1986, **11** (6): 377~379.
- [8] M. Cronin-Golomb, C. D. Brandle, Ring self-pumped phase conjugator using total internal reflection in photorefractive strontium barium niobate. *Opt. Lett.*, 1989, **14** (9): 462~464
- [9] G. J. Salamo, M. J. Miller, W. W. Clark III *et al.*, SBN as a self-pumped phase conjugator. *Opt. Commun.*, 1986, **59** (5/6): 417~422
- [10] Youlong Yu, Haiying Xu, Yang Yuan, *et al.*, Real-time edg enhancement using self-pumped phase conjugation in  $\text{BaTiO}_3$ . *Opt. Commun.*, 1990, **79**(1/2): 19~22
- [11] K. R. Macdonald, J. Feinberg, Theory of a self-pumped phase conjugator with two coupled interaction regions. *J. O. S. A*, 1983, **73**(5): 548~553

## Studies of the properties of self-pumped phase conjugation in KNSBN:Co crystals

YU YOU LONG    JIANG ZUOHONG    GAO JUN    WANG RAN

(Department of Physics, Heilongjiang University, Harbin 150080)

JIANG QUANZHONG    SUN DALIANG    CHEN HUANCHU

(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 16 October 1991; revised 9 December 1991)

### Abstract

Self-pumped phase conjugation (SPPC) has been observed in KNSBN:Co crystals with sizes different. The dependence of phase conjugate reflectivity has been proved not only on the incident angle and incident position, but also on the laser wavelengths by experiments. Their experimental plots are shown respectively. The large crystal produce up to 73.0% phase conjugate reflectivity at 514.5 nm. The dependence of phase conjugate formation time on input intensity is shown. During producing the phase conjugation, the character of both intensities of the transmitted beam and reflected beam of the crystal varying with the time is presented. The reason for producing threshold intensity is explained.

**Key words** KNSBN:Co crystals, self-pumped phase conjugation, phase conjugation.