

文章编号: 0258-7025(2002)08-0694-05

# Ce:KNSBN 光折变光纤两波耦合特性研究

刘宏利<sup>1</sup>, 王肇圻<sup>1</sup>, 梁宝来<sup>1</sup>, 张春书<sup>1</sup>, 陈焕矗<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 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)  
(<sup>2</sup> 山东大学晶体材料研究所, 山东济南 250100)

**提要** 研究了掺铈钾铌酸锆(Ce:KNSBN)光折变光纤“扇”特性及两波耦合的基本特性。通过实验发现,当入射光的入射角为 $8^\circ$ 左右时,“扇”最小,这与块状晶体有根本的不同。在信号光与抽运光的入射夹角 $2\theta$ 小于 $11^\circ$ 时,两波耦合增益随入射夹角的增大而增大,而当入射夹角大于 $11^\circ$ 时,两波耦合增益随着入射夹角的增大而迅速减小。给出了在各个不同的入射夹角下,两波耦合增益中透射的信号光的时间特性曲线。两波耦合增益随信号-抽运比的增加而增加,在入射夹角为 $8^\circ$ ,信号-抽运比为1:1000时,两波耦合增益达到了77,比块状晶体相应条件下提高了4倍。用两波耦合的理论公式对增益随信号-抽运比的实验数据进行了拟合,二者相符。

**关键词** 光折变光纤,两波耦合,“扇”

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

## Study on Properties of two-wave Coupling with Ce:KNSBN Photorefractive Fiber

LIU Hong-li<sup>1</sup>, WANG Zhao-qi<sup>1</sup>, LIANG Bao-lai<sup>1</sup>, ZHANG Chun-shu<sup>1</sup>, CHEN Huan-chu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Modern Optics, Nankai University, Opto-electronic Information  
Science and Technology Lab, E. M. C., Tianjin 300071)  
(<sup>2</sup> Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

**Abstract** Properties of fanning effect and two-wave coupling in a Ce:KNSBN photorefractive fiber were studied. It is found that the fanning is weak when the incident angle is about  $8^\circ$ , which differs from that in a bulk crystal. Two-wave coupling gain increases as the angle between pump beam and signal beam increases when the angle is less than  $11^\circ$ . It decreases as the angle increases when the angle is greater than  $11^\circ$ . The time evolution of transmitting signal beam at different angles was also given. The two-wave coupling gain is 77 in the conditions that the angle is  $8^\circ$  and the signal-to-pump beam intensity ratio is 1:1000, which is about 4 times that in a bulk crystal in the same conditions. The theoretical fitting and the experimental data are coincident quite well.

**Key words** photorefractive fiber, two-wave mixing, fanning

## 1 引言

块状光折变晶体由于在数据存储、光学相关、弱信号放大、位相共轭等方面的应用而吸引了许多研究者的注意<sup>[1-4]</sup>,80年代末,许多研究者又开始对光折变光纤和波导中的非线性现象进行了研究。光折变光纤有诸多的优点,更容易生长,利用激光加热生长技术,人们可以更方便地生长出光学性能好的

光折变光纤<sup>[5]</sup>。由于光折变光纤的几何形状,入射光束在晶体内部相互作用的距离比较长,可以使晶体的光折变特性得到更充分的利用。在用光折变晶体进行数据存储应用中,需要比较大的横截面,此时可以用多个光折变光纤排成光纤阵列的形式来得到。光折变光纤又特别适于和光学光纤耦合,因而在光纤通信中有重要应用<sup>[6]</sup>。

两波耦合是光折变效应的一种基本过程,有许

收稿日期 2001-05-10;收到修改稿日期 2002-01-28

基金项目 国家自然科学基金(批准号 60177006)资助项目。

作者简介 刘宏利(1975—),男,山东人,南开大学现代光学研究所学生,博士,主要从事光学信息处理等方面的研究。E-mail: liuhl@eyou.com

多文献报道了光折变光纤两波耦合的理论和实验结果。A. A. Kamshilin 等报道了用 632.8 nm 的激光在  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  类光纤晶体中进行两波耦合的增益  $G$  随信号 - 抽运比  $\beta$  及空间频率变化的实验结果<sup>[7]</sup>, Lambertus Hesselink 报道了用 514.5 nm 的激光在 SBN 光纤晶体中进行两波耦合的衍射效率  $\eta$  随参考光的光强变化的实验结果<sup>[8]</sup>。A. A. Kamshilin 等报道了在  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  光纤晶体中两波耦合增益随空间频率变化的实验结果<sup>[9]</sup>。Shizhuo Yin 报道了  $\text{LiNbO}_3$  光纤的制造以及在全息存储等方面的应用<sup>[10]</sup>。而对 KNSBN 光折变光纤特性的研究尚未有报道。本文则实验研究了掺铈钾铌酸锶( $\text{Ce}:\text{KNSBN}$ )光折变类光纤晶体两波耦合的特性和“扇”特性,发现了这些特性不仅不同于块状晶体,也与已报道的其他材料的光折变光纤有很大的不同。

## 2 实验结果和讨论

所用实验装置如图 1 所示,晶体为山东大学晶体所生产的  $1\text{ mm} \times 1.9\text{ mm} \times 10\text{ mm}$   $\text{Ce}:\text{KNSBN}$  晶体。偏振分束器 BS 把  $\text{Ar}^+$  的 514.5 nm 激光分为两束,一束由反射镜  $M_1$  反射作为信号光  $I_s$ ,  $I_s$  的偏振态和光强由偏振片  $P_1$  和半波片  $\text{HWP}_1$  调节;另一束由反射镜  $M_2$  反射作为抽运光  $I_p$ ,  $I_p$  的偏振态和光强由偏振片  $P_2$  和半波片  $\text{HWP}_2$  调节。 $I_s$  与  $I_p$  相互作用在晶体内写入体光栅,光栅波矢与晶体的  $c$  轴平行,信号光经过晶体后由光电探测器接收,并测量出射

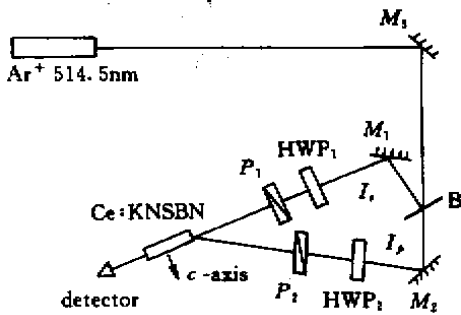


图 1 实验装置图

Fig.1 Scheme of experimental setup

光的功率。所用的激光为半径 0.7 mm 的光束,信号光的入射方向与光纤的轴向平行。 $\text{Ar}^+$  激光器的输出功率为 200 mW,反射镜  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  均为反射率大于 94% 的高反镜。实验过程中始终保持信号光的入射方向不变,通过调整抽运光的入射方向来改变  $2\theta$

的大小。在本实验中,信号光  $I_s$  和抽运光  $I_p$  都为  $e$  光。

在稳态情况下,两波耦合的有效增益为

$$G = [I_s(d \chi I_p \neq 0)] / [I_s(d \chi I_p = 0)] = \frac{(1 + \beta) \exp(\Gamma d)}{1 + \beta \exp(\Gamma d)} \quad (1)$$

式中  $\beta = I_s/I_p$  为入射信号光与抽运光的比值,  $\Gamma$  为增益系数,  $d$  为相干长度。

通常情况下,  $\Gamma$  可表示为<sup>[11]</sup>

$$\Gamma = [(2\pi R r_{\text{eff}}) / (\lambda n)] \tilde{E} \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为光波在真空中的波长,  $n$  为折射率,  $r_{\text{eff}}$  为有效电光系数,  $R$  为电子-空穴对抗因子,  $\tilde{E}$  为饱和空间电荷场的虚部,如果没有外加电场,根据纯扩散模型,  $\tilde{E}$  可以表示为

$$\tilde{E} = E_d (1 + E_d/E_q) \quad (3)$$

式中  $E_d = K_B T K_g / q$  为扩散场,  $E_q = q N_{\text{eff}} / (\epsilon_0 \epsilon k_g)$  为稳态空间电荷场的最大值。 $K_B$  为玻耳兹曼常数,  $q$  为电子的电量,  $\epsilon_0 \epsilon$  为介电常数,  $N_{\text{eff}} = N_A (1 - N_A/N_q)$  为有效光折变电荷密度,  $K_g = 2\pi/\Lambda_g$ ,  $\Lambda_g = \lambda \lambda (2 \sin \theta)$  为光栅间隔。

首先研究光纤中的“扇”。“扇”不仅影响着两波耦合增益的大小,还影响了两波耦合增益达到稳态的时间。我们只保留一束光,光强为 700 mW,改变入射光的入射角度,通过光电探测器测量入射光通过光折变光纤后的透射光光强随时间的变化情况。所得到的实验数据如图 2(a)(b)所示。在小角度的情况下(图 2(a)),在  $2^\circ$  时,由于晶体内部的“扇”的影响,透射光开始时为 29, 10 s 左右迅速下降到 16,下降了 45%。但是随着角度的增大,“扇”逐渐减小,透射光下降的速度和强度都随着减小。在  $5^\circ$  时透射光只下降了 16%,并且透射光下降的非常缓慢,在 150 s 左右才达到稳态值。

大角度下“扇”的实验数据如图 2(b)。在入射光的入射角度为  $8^\circ$  时,晶体中“扇”还比较小,透射光下降得也比较缓慢,但是随着入射光角度的增大,“扇”的影响也越来越大,透射光下降也变得越快。在入射光的入射角度为  $16^\circ$  时,在 15 s 左右的时间里,透射光从开始时的 29 迅速下降到 5。这是由于光折变光纤晶体的尺寸都比较小,在入射角度比较大的时候,入射光会在晶体内部发生反射,角度与入射光束的光斑大小、入射位置以及晶体的几何尺寸有关。在我们的实验装置中,入射光大约在  $9^\circ$  左右开始发生反射,在  $13^\circ$  附近全部反射。发生反射时,入射光会在光纤晶体内部形成比较强的“扇”,从

达到稳态(图 4(a))。

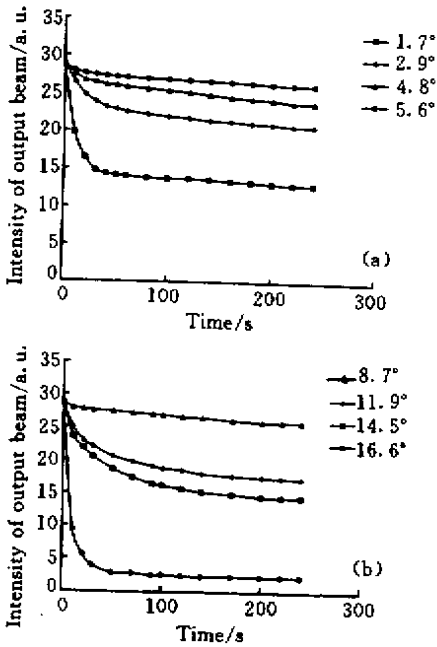


图 2 在小入射角度(a)和大入射角度(b)下 输出光强度随时间的变化关系

Fig.2 Dependence of intensity of output beam on time at small incident angle(a) and large incident angle(b)

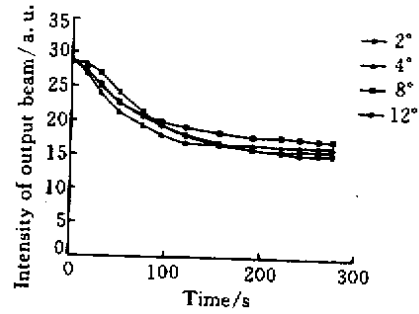


图 3 块状晶体中输出光强度随时间的变化关系  
Fig.3 Dependence of intensity of output beam on time at a bulk crystal

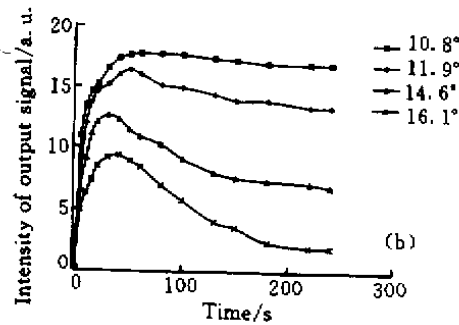
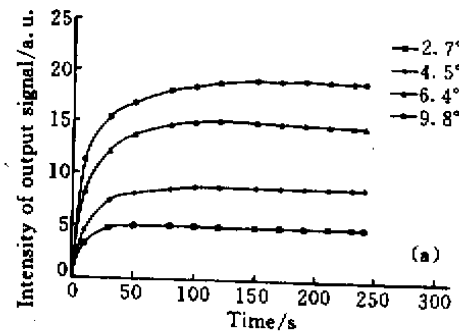


图 4 两波耦合实验中,在小入射角(a)和大入射角(b)情况下 输出的信号光强度与时间的关系

Fig.4 Dependence of intensity of output signal on time at small incident angle (a) and large incident angle (b) in two-wave coupling experiment

而减弱了透射光的输出。

我们对块状晶体中的“扇”(见图 3)进行了比较。所用的块状晶体为 5 mm × 5 mm × 5.5 mm 的 Ce:KNSBN,测得了不同角度下的晶体“扇”,实验数据如图 3 所示。通过比较可以看出,在不同角度下,块状光折变晶体中“扇”的影响基本都一样,从开始时透射光的光强为 29,到 150 s 左右下降到 16,下降了约 44%。在块状的 Ce:BaTiO<sub>3</sub>晶体中,“扇”随着入射角的增大而增大,在入射光角为 25°时,达到稳态时的“扇”光为 7.5,随着入射角度的增大,“扇”光也随着增大,当入射光角度为 35°时,“扇”光上升为 14,当入射光角度为 45°时,“扇”光为 20<sup>[12]</sup>。而在光折变光纤晶体中,在小角度下,“扇”随着入射角度的增大而逐渐减小,但当达到一定角度时,“扇”又会随着入射角度的增大而增大。

保持信号光和抽运光的光强分别为 7 mW 和 700 mW,实验研究了在各个不同入射夹角下,两波耦合中透射的信号光强度随时间的变化关系,实验数据如图 4(a)(b)。在入射夹角比较小时,随着角度的增大,两波耦合达到稳态的时间随着角度的增大而增大。在角度为 2°时,大约在 10 s 时达到稳态,在角度为 4°时,约为 50 s,角度为 9°时则在 90 s

但是当入射夹角较大时,两波耦合时间特性曲线与小角度时有明显的不同(图 4(b))。当信号光和抽运光的入射夹角大于 11°时,透射的信号光开始时先增大,在 50 s 左右达到最大值,然后又逐渐减小,并且入射夹角越大,透射的信号光减小得越厉害。在 12°时透射的信号光从最高值 16 下降到了 12,而在 16°时,从最高值 9 下降到 2。这是因为当入射夹角较大时,由于入射的抽运光在光纤内部发生了反射,此时会在光纤内部形成复杂的“扇”,减弱了

两波耦合增益的效果。另外,当信号光和抽运光在光纤内部耦合时,在晶体前端面到入射的抽运光在光纤内部发生反射前的这段范围内,两波耦合时能量是从抽运光流向信号光,但是在入射的抽运光在光纤内部发生反射后到晶体的后端面这段范围内,能量又从信号光返回了抽运光。最后输出的信号光增强或者是减弱的程度与信号光在晶体内部增强或者是减弱的距离以及晶体内部形成的“扇”有关。这种情况是光折变光纤所特有的,正是由于这种增强和减弱两种过程的相互作用,使得光折变光纤的两波耦合增益与块状晶体明显不同。

图 5 是增益  $G$  随信号光和抽运光的入射夹角  $2\theta$  的变化关系。在此实验中,信号光和抽运光的光强分别为 7 mW 和 700 mW。在小角度时,增益  $G$  比较小,在  $2^\circ$  时仅为 2 倍,随着入射夹角的增大,增益也迅速增大,在入射夹角为  $6^\circ$  时,增益达到了 56 倍,在  $6^\circ$  到  $11^\circ$  之间增益随角度的变化比较平缓。当入射夹角再增大时,增益随着角度的增大又迅速减小,到入射夹角为  $19^\circ$  时,增益已经是小于 1 了。而在块状晶体中,两波耦合增益首先随着入射夹角的增大逐渐增大,大约在  $40^\circ$  时增益达到最大值,然后随着入射夹角的增大逐渐减小,但是下降非常缓慢,基本上在信号光和抽运光的角度大于  $40^\circ$  时,增益不再变化。光折变光纤晶体的两波耦合中,增益随入射夹角的变化情况和块状晶体完全不同<sup>[14]</sup>。

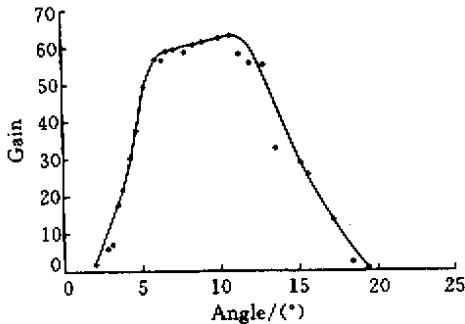


图 5 两波耦合增益  $G$  随两束光的入射夹角  $2\theta$  的关系

Fig. 5 Dependence of gain  $G$  on external cross angle  $2\theta$

图 6 是两波耦合增益  $G$  与光强比  $\beta$  的关系。在此实验中,信号光  $I_s$  和抽运光  $I_p$  的入射夹角为  $8^\circ$ 。图中空心圆点是实验数据,实线是根据公式(1)理论拟合的曲线。在信号光和抽运光的比大于 0.1 时,两波耦合增益随信号-抽运比的减小变化比较小,信号光放大了 2 倍到 6 倍之间,当信号-抽运比在 0.1 和 0.0016 之间时,两波耦合增益随信号-抽运比的

减小而迅速增加,在信号-抽运比为 0.0016 时,两波耦合增益上升为 75。然后随着信号-抽运比减小两波耦合增益达到饱和值 77 左右,比块状晶体相应条件下提高了 4 倍<sup>[13]</sup>。通过理论拟合得到此光折变光纤两波耦合增益系数  $\Gamma = 5.56 \text{ cm}^{-1}$ ,这与文献[14]所报道的块状 Cr:KNSBN 和 Cu:KNSBN 晶体增益系数的数量级相同。在信号-抽运比为 1:200 时,透射后信号光和透射后抽运光的比值变为 1:5。

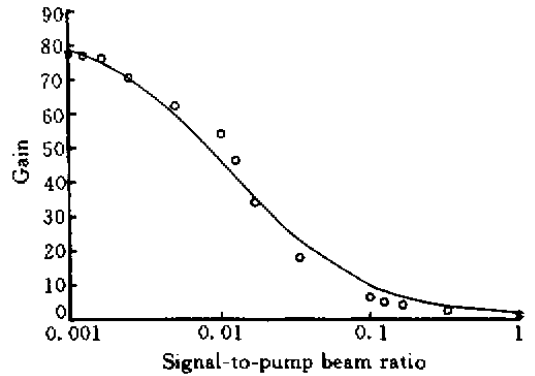


图 6 两波耦合增益  $G$  随信号-抽运比  $\beta$  的关系

Fig. 6 Dependence of gain on signal-to-pump beam ratio

### 3 结 论

本文实验研究了 Ce:KNSBN 光折变光纤中  $e$  光两波耦合特性和“扇”特性,发现这些特性不仅与块状的光折变晶体完全不同,也与已报道的其他材料的光纤状晶体不同。在我们的实验条件下,当入射光为小角度时,“扇”随入射角度的增大而减小,并逐渐趋于一个较小的稳定值,而当入射光为大角度时,“扇”随入射角度的增大而增加。与“扇”特性相对应的,在小角度下,两波耦合增益随入射夹角的增加而迅速上升,而在大角度下,两波耦合增益又随入射夹角的增加而迅速下降,甚至小于 1。这是光折变光纤特殊的几何形状和 KNSBN 晶体特殊的光折变效应所产生的结果。

### 参 考 文 献

- 1 J. Feinberg, R. W. Hellwarth. Phase-conjugation mirror with continuous-wave gain [ J ]. *Opt. Lett.*, 1980, 5( 12 ): 519 ~ 521
- 2 S. Yin, H. Zhou, F. Zhao *et al.*. Wavelength multiplexed holographic storage in a sensitive photorefractive crystal using a visible-light tunable diode laser [ J ]. *Opt. Comm.*, 1993, 10( 5 6 ): 317 ~ 321
- 3 J. Feinberg. Real-time edge enhancement using the photorefractive effect [ J ]. *Opt. Lett.*, 1980, 5( 8 ): 330 ~

- 332
- 4 A. E. Chiou , P. Yeh. Parallel image subtraction using a phase-conjugate Michelson interferometer [ J ]. *Opt. Lett.* , 1986 , **11** ( 5 ) 306 ~ 308
  - 5 R. S. Feigelson , W. L. Kway , R. K. Route. Single crystal fibers by the laser-heated pedestal growth method [ J ]. *Opt. Eng.* , 1985 , **24** ( 6 ) :1102 ~ 1107
  - 6 Francis T. S. Yu , Shizhuo Yin , Jianzhong Zhang *et al.* . Application of a fiber-speckle hologram to fiber sensing [ J ]. *Appl. Opt.* , 1994 , **33** ( 22 ) 5202 ~ 5203
  - 7 A. A. Kamshilin , V. V. Prokofiev , R. Silvennoinen *et al.* . Highly efficient hologram enhancement in Bi<sub>12</sub>TiO<sub>20</sub> fibre-type crystal [ J ]. *Optical and Quantum Electronics* , 1994 , **26** ( 4 ) : 379 ~ 385
  - 8 Lambertus Hesselink , Steve Redfield. Photorefractive holographic recording in strontium barium niobate fibers [ J ]. *Opt. Lett.* , 1988 , **13** ( 10 ) 877 ~ 879
  - 9 A. A. Kamshilin , R. Silvennoinen , T. Jaaskelainen. Two-wave mixing in photorefractive Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub> fibers [ J ]. *Opt. Lett.* , 1993 , **18** ( 9 ) 690 ~ 692
  - 10 Shizhuo Yin. Lithium niobate fibers and waveguides : Fabrications and applications [ J ]. *Proc. IEEE* , 1999 , **87** ( 11 ) :1962 ~ 1974
  - 11 R. A. Vazquez , F. R. Vachss , R. R. Neurgaonkar *et al.* . Large photorefractive coupling coefficient in a thin cerium-doped strontium barium niobate crystal [ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B* , 1991 , **8** ( 9 ) :1932 ~ 1941
  - 12 Tong Zhao , Lingzhi Zeng , Rongping Wang *et al.* . Isotropic beam fanning in photorefractive Ce : BaTiO<sub>3</sub> [ J ]. *Chinese Journal of Light Scattering* ( 光散射学报 ) , 1999 , **11** ( 1 ) 46 ~ 53 ( in Chinese )
  - 13 H. Zhang , B. Guo , H. Jiang *et al.* . Characterization of the KNSBN : Cu crystal with two-wave coupling at visible and infrared wavelengths [ J ]. *Appl. Phys. B* , 1995 , **61** ( 2 ) 207 ~ 211
  - 14 Yasuo Tomita , Johan Bergquist , Masa-aki Shibata. Photorefractive properties of undoped , Cr-doped and Cu-doped potassium sodium strontium barium niobate crystals [ J ]. *J. Opt. Soc. Am. B* , 1993 , **10** ( 1 ) 94 ~ 99