

KNSBN 掺 Ce 晶体环形腔 自泵浦位相共轭 *

孙大亮 陈 军 宋永远 姜全忠 陈焕矗

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

许京军 武原庆 刘思敏 张光寅

(南开大学物理系, 天津)

摘要 利用 $(\text{KNa})_{0.1}(\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25})_{0.9}\text{Nb}_2\text{O}_6$ 掺 Ce a 面斜切晶体实现了无外场、无外反射镜、无外加泵浦光束自泵浦连续波位相共轭, 其相共轭反射率达 25%, 阈值功率小于 0.03 W/cm^2 。并首次模拟了其光折变耦合系数与晶体 a 面斜切角的关系。

关键词 光折变晶体, 自泵浦位相共轭

Ring self-pumped phase conjugation of Ce-doped KNSBN crystals

Sun Daliang, Chen Jun, Song Yongyan, Jiang Quangzhong, Chen huanchu

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

Xu Jingjun, Wu Yuanqing, Liu Simin, Zhang Guangyin

(Physics Department, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract Self-pumped phase conjugation in a -face titled-cut Ce-doped $(\text{KNa})_{0.1}(\text{Sr}_{0.75}\text{Ba}_{0.25})_{0.9}\text{Nb}_2\text{O}_6$ crystal was demonstrated without external reflection mirrors, pumping beam and applied field, and phase conjugation reflectivities as high as 25% were measured. The threshold power was lower than 0.03 W/cm^2 . Its photorefractive coupling constant was computed for various a -face titled-cut angles for the first time.

Key words photorefractive crystal, self-pumped phase conjugation

1 导 言

铌酸锶钡(SBN)、钾钠铌酸锶钡(KNSBN)作为光折变、非线性材料,由于其优良的光折变

收稿日期: 1991 年 4 月 8 日。

* 受国家科委“863”课题资助。

性能,已被广泛地用于全息存贮、实时光学位相补偿、双光束耦合放大、动态微分干涉等。SBN 晶体和 KNSBN 晶体在室温下都是四方相,其中 SBN 具有较大的横向电光系数,而 KNSBN 则具有较大的纵向电光系数。同光折变性能优良的晶体钛酸钡(BaTiO_3)、铌酸钾(KNbO_3)相比容易生长,特别是生长周期短,一天一夜可得到不退火的毛坯晶体,晶体的加工也比较容易,在由高温到低温的退火过程中经历简单的四方—四方相变,没有孪晶、易于极化,又由于 SBN 和 KNSBN 系列具有较大的固溶体范围,较大程度的掺杂和取代,易根据不同应用的要求,研制生长出不同组分、特殊性能的晶体。总之,SBN 和 KNSBN 系列晶体是很有前途的光折变、非线性材料。

利用 BaTiO_3 晶体较早地实现了自泵浦位相共轭波,直到 1986、1987 年,才利用 SBN 掺 Ce 及 KNSBN-2 掺 Ce 获得了自泵浦位相共轭^[1]。近两年我们实验室先后利用 KNSBN 掺 Ce^[2]、KNSBN 掺 Co、KNSBN 掺 Cu、KNSBN 掺 Ce 掺 Cu 晶体实现了自泵浦位相共轭。本文报道 KNSBN 掺 Ce 晶体的生长及其环形腔的自泵浦位相共轭的实现。

2 晶体的生长与准备

我们生长的 KNSBN 掺 Ce 晶体为 $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})_{0.2}(\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39})_{0.9}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (以下简称为 KNSBN : Ce 或 Ce-KNSBN), 掺 Ce 浓度为 0.05 wt%。所用原料为高纯(99.99%)的 K_2CO_3 、 Na_2CO_3 、 SrCO_3 、 BaCO_3 、 Nb_2O_5 和光谱纯的 CeO_2 。生长设备为自英国进口的 MCGS-3 晶体生长与材料制备系统。以高频感应加热,采用熔体提拉方法生长晶体,其生长情况为

生长气氛:	大气	生长温度:	约 1500 °C
提拉转速:	10~20 r/min	生长速度:	5 mm/h
晶体形状:	圆柱形	晶体尺寸:	20×20×20 mm ³
晶体颜色:	红色		

KNSBN : Ce 晶体属于钨青铜 $(\text{K}_y\text{Na}_{1-y})_{2A-2}(\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x})_{2-A}\text{Nb}_2\text{O}_6$ 固溶体系列,当 $A=1.2$ 时,钨青铜型结构的 A 位置是充满的,我们生长的 KNSBN 掺 Ce 晶体的 A 位置是非充满的,其 $A=1.1$,它不同于 J. Rodriguez 和 S. R. Montgomery 用于实现自泵浦位相共轭实验的 A 位置充满的 KNSBN-2 晶体^[3],钨青铜系列更为一般的表达式为: $(\text{A}_1)_{2-A}(\text{A}_2)_{2A-2}\text{C}_{0.8}\text{B}_2\text{O}_6$,其中 A_1 、 A_2 、C 和 B 分别为 15-、12-、9-和 6-配位体位置,我们实验室生长的 KNSBN : Ce 晶体,其 15-、12-配位体位置由 K^+ 、 Na^+ 、 Sr^{2+} 和 Ba^{2+} 离子占据了 91.7% (即 1.1/1.2), Nb^{5+} 离子占据 6-配位体位置,而 Ce 离子占据 12-配位体,也可能进入 9-和 6-配位体位置^[3]。生长出的晶体在空气气氛中退火 2~3 天,然后再直流极化 20 min 左右,极化温度在 KNSBN : Ce 晶体的居里点附近。一般 KNSBN 晶体在 130 °C 以上极化,极化电压不小于 300 V/mm。极化后的晶体定向、切割成梯形(见图 1(b)),六面抛光,晶体样品的尺寸为 $6\times 6\times 6\text{ mm}^3$,其梯形的 a 面斜切角为 $11^\circ 50'$ ($\beta = 11^\circ 50'$),请见图 1(b)中表示出的 β 角)。

3 自泵浦位相共轭镜的设计

本文报道的自泵浦位相共轭反射镜可称为无外反射镜、无外加泵浦光、无外加电场的晶体内环形腔自泵浦位相共轭反射镜。它不同于利用晶体外部的反射镜反射透射光泵浦的自泵浦位相共轭镜,因而减小了体积。环形腔自泵浦位相共轭镜比猫式自泵浦位相共轭反射镜容易获

得,特别是当光折变耦合系数较低时更是如此。猫式自泵浦位相共轭镜是 J. Feinberg 在 1982 年用 BaTiO₃ 晶体实验成功的,在晶体内有两个四波混频相互作用区(见图 1(a))^[4]。利用 BaTiO₃ 晶体的自泵浦位相共轭反射镜较成功,而利用 SBN, KNSBN 晶体实现自泵浦位相共轭波的报道则较少, KNSBN 晶体的光折变性能在我们实验室得到了较深入的研究。

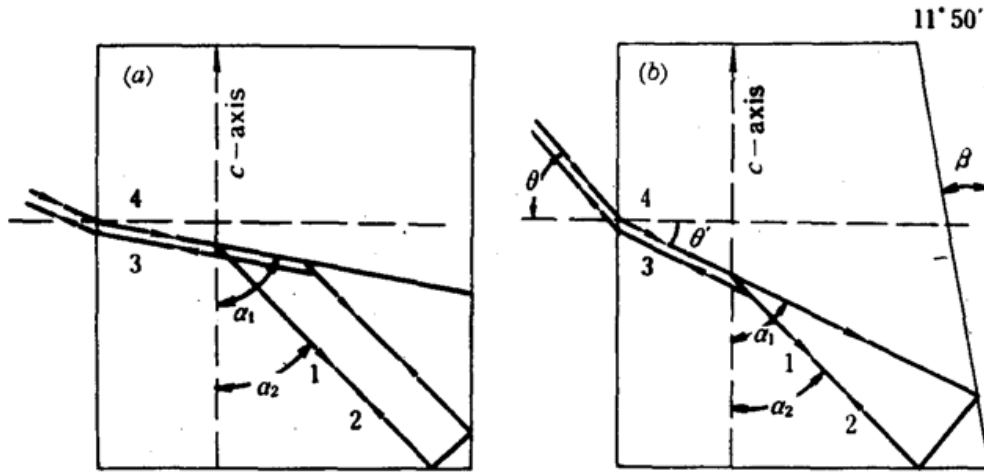


Fig. 1 a) Phase conjugator with two interaction regions of four-wave mixing. The direction of the c -axis of KNSBN crystal, α_1 and α_2 are shown. Beam 1 and 2 are pumping beams generated from input wave 4. Each interaction region contributes to the phase-conjugate output wave 3. b) Ce-doped KNSBN ring phase-conjugator with one interaction region. Beam 2 is the total internal reflection of beam 4. Beams 1 and 2 are pumping waves. Beam 3 is the phase-conjugate wave produced by four-wave mixing. a -face tilted-cut angle β is shown

在晶体内环形腔 KNSBN 掺 Ce 自泵浦位相共轭镜 a 面斜切晶体的设计、加工之前,我们首先计算模拟了光折变耦合系数。耦合系数由下式给出

$$\gamma = \frac{W r_{eff} E}{2n c \cos(\alpha_1 - \alpha_2)} \quad (1)$$

其中电场 E 为

$$E = R \times \frac{k_B T}{q} \times \frac{K \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{1 + (K/K_0)^2} \quad (2)$$

$W = 2\pi c/\lambda$, λ 是真空波长; $n = n(\lambda)$ 是折射率; R 为空间电荷场形成过程的电子—空穴竞争因子; $K_0^2 = q^2 N_{eff} / K_B T \epsilon \epsilon_0$, $K_B T$ 是单位电荷的热能, $\epsilon \epsilon_0$ 是在光栅方向的介电常数, $\epsilon = \epsilon_{33} \sin^2[(\alpha_1 + \alpha_2)/2] + \epsilon_{11} \cos^2[(\alpha_1 + \alpha_2)/2]$, N_{eff} 是光折变有效电荷密度, $K = 2(nW/c) \sin(\alpha_1 - \alpha_2)/2$ 是光栅矢量的大小, α_1 和 α_2 的定义请见图 1, r_{eff} 为有效电光系数, 当入射光束为非常光时

$$r_{eff} = \{n_0^4 r_{13} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + 2n_0^2 n_e^2 r_{42} \cos^2[(\alpha_1 + \alpha_2)/2] + n_e^4 r_{33} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2\} \sin[(\alpha_1 + \alpha_2)/2] \quad (3)$$

因为在实验中所用产生自泵浦位相共轭波的光束为非常光, 故这儿对常光入射的有效电光系数公式就不写出了。由上面各式可知耦合系数 γ 是波长、温度、 α_1 和 α_2 的函数, 对于特定的波长和温度, 耦合系数则为 α_1 和 α_2 的函数。在这里我们假设电光系数 (r_{13} 、 r_{42} 、 r_{33}) 不依赖于波长, 还假设在空间电荷场的形成过程中无电子—空穴竞争, 即假设 (2) 式中的电子—空穴竞争因子 $R = 1$ 。通过二波耦合实验我们测量计算了 KNSBN 掺 Ce 晶体非常光入射的有效光折变电荷

密度 N_{eff} 。依据实验测得的有效光折变电荷密度 $N_{eff} = 3.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和以上三式我们模拟计算了耦合系数 γ ，图 2 给出了对于一系列给定 α_1 值的 $\gamma \sim \alpha_2$ 关系曲线。从图 2 可以看出当 α_1 取值在 $45^\circ \sim 75^\circ$ 之间时耦合系数 γ 有比较大的数值，此时，从图 1 可知如果按图 1(b) 所示将晶体沿 a 面以一定的角度斜切成梯形，则与 c 轴夹角为 α_1 的光束 4 将发生全内反射，且在晶体内部能与光束 4 自身相交而发生相互作用，可能相交的情况见图 1(b)。在上面提到的猫式自泵浦位相共轲反射镜中，即图 1(a) 中，光束 2 为泵浦光束，它起源于光束 4 的散射光，我们考虑用光束 4 的全内反射光束加强泵浦光束 2，实际上在图 1(b) 中的全内反射光束 2 代替了图 1(a) 中起源于散射光的泵浦光束 2，而且全内反射光束 2 一定强于散射产生的泵浦光束，因此可以预料这种 a 面斜切晶体自泵浦位相共轲反射镜会有较低的阈值功率和较快的自泵浦响应时间。

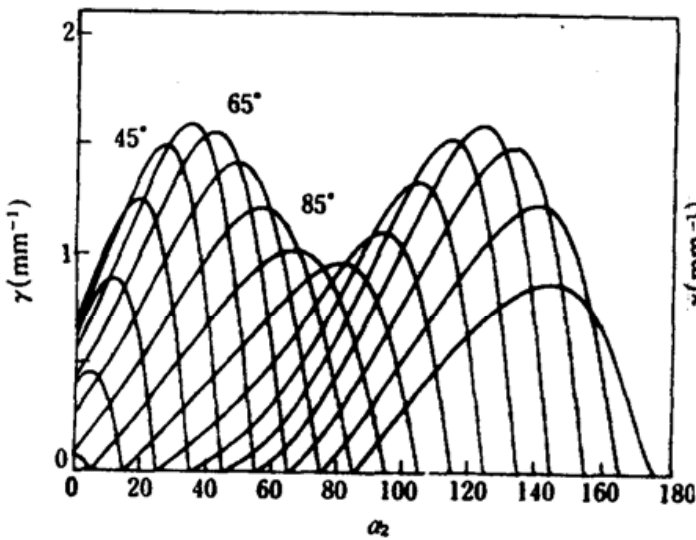


Fig. 2 Plot of the computed coupling constant γ versus angle α_2 for various angles α_1 for a Ce-doped KNSBN crystal with a measured effective number density of charges $N_{eff} = 3.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Other parameters approximately used in this computation are: index of refraction $n_o = 2.4$, $n_e = 2.3$, dielectric constants $\epsilon_{11} = 380$, $\epsilon_{33} = 120$, and electrooptic coefficients: $r_{13} = 30 \times 10^{-12} \text{ V/m}$, $r_{42} = 250 \times 10^{-12} \text{ V/m}$ and $r_{33} = 110 \times 10^{-12} \text{ V/m}$

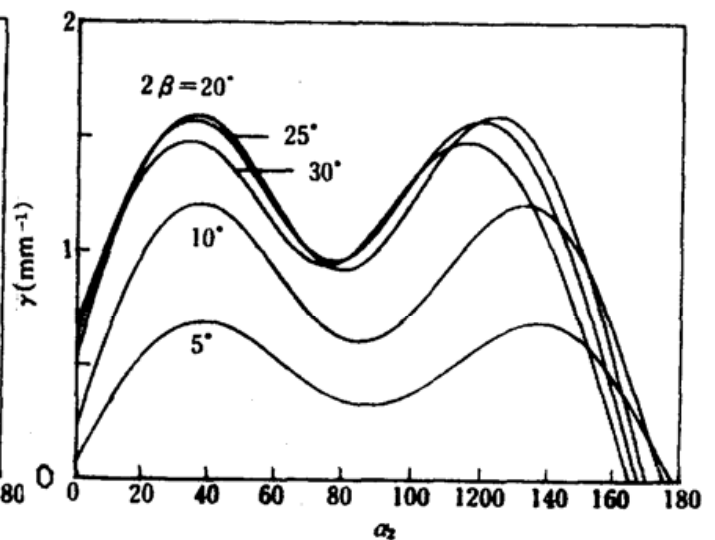


Fig. 3 Plot of the computed coupling constant γ versus the angle α_2 for various a -face tilted angles β for the Ce-doped KNSBN crystal, which is based on the same parameters for Fig. 2

我们继续讨论沿 a 面斜切角 β 的取值。从图 1(b) 的几何图形分析中可以知道晶体的 a 面斜切角 β 满足关系式: $2\beta = \alpha_1 - \alpha_2$ ，从图 1(b) 中的角度关系上我们还可以进一步推知入射光束 4 和它在晶体内部全内反射光束的夹角恰好等于晶体沿 a 面的斜切角 β 的二倍，由于 $2\beta = \alpha_1 - \alpha_2$ 成立，耦合系数 $\gamma = \gamma(\alpha_1, \alpha_2)$ ，可写为 $\gamma = \gamma(\alpha_2, 2\beta)$ ，耦合系数为晶体内部光束耦合夹角 2β 和 α_2 的函数，即为晶体的 a 面斜切角 β 和 α_2 的函数，图 3 给出了对不同斜切角 β 的 $\gamma \sim \alpha_2$ 关系曲线。从图 3 可以得知，当 $2\beta = \alpha_1 - \alpha_2 = 20^\circ$ 时，耦合系数有峰值，此时， $\beta = 20^\circ/2 = 10^\circ$ 。为了使入射光束 4 更易在晶体内部发生全反射，我们加工晶体时实际上取 $\beta = 11^\circ 50'$ ，即 $\alpha_1 - \alpha_2 = 2\beta$

$= 23^{\circ}40' \sim 25^{\circ}$,从图 3 中可以看出取此斜切角时耦合系数仍然具有较大的数值。图 1(b) 示出了我们获得的单区域四波混频相互作用 KNSBN:Ce 内环形腔自泵浦位相共轭反射镜的有关光路。

4 实验结果与讨论

图 4 示出了自泵浦位相共轭实验的基本光路,所用光源为氦—氖激光器,激光器前放置偏振器,以提供记录光栅的偏振非常光束,其偏振方向示于图中,分束镜用来分出部分自泵浦位相共轭光束,以便实验测量。其光束直径为 2 mm,利用光电二极管和功率计探测光束的强度。

自泵浦位相共轭反射率 R 与光束在晶体表面的入射角 θ (θ 角在图 1 中标出) 有一定的关系,实验测得当入射角 $\theta = 50^{\circ}$ 时,自泵浦位相共轭反射率达到最大值 25%,这时相应于 $\theta' \sim 20^{\circ}$, $\alpha_1 \sim 70^{\circ}$, $\alpha_2 \sim 45^{\circ}$ (θ' 角也在图 1 中标出),实测自泵浦位相共轭反射率峰位 $\alpha_2 = 45^{\circ}$ 基本上与图 3 中理论计算的 $2\beta = \alpha_1 - \alpha_2 = 70^{\circ} - 45^{\circ} = 25^{\circ}$ 曲线的峰位相一致。

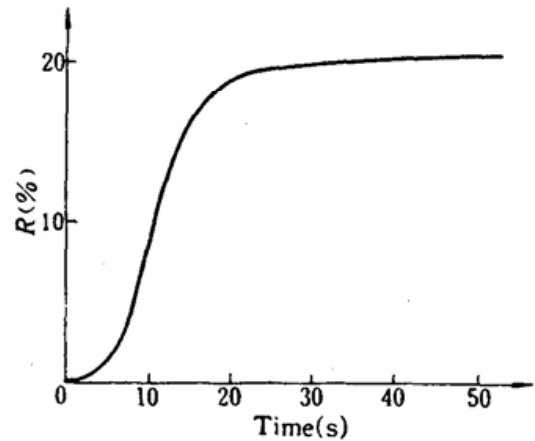
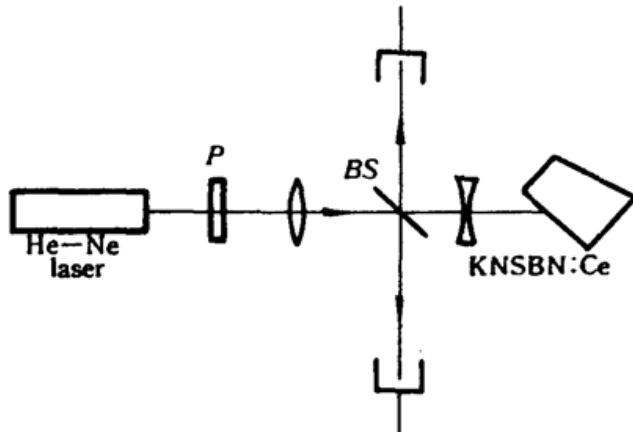


Fig. 4 Experimental set-up for Ce-KNSBN ring self-pumped phase conjugation. P - polarization rotator; BS - beam splitter

Fig. 5 Typical plot of phase-conjugate reflectivity R as a function of time for an incident intensity of 0.6 W/cm^2 at the incident angle of 44°

我们还测量了自泵浦位相共轭建立时间,图 5 为当光束在晶体表面的入射角 $\theta = 44^{\circ}$,入射光强为 0.6 W/cm^2 时,典型的自泵浦位相共轭反射率随时间的建立曲线,其响应时间为 9.5 s,这里定义响应时间为自泵浦光强达到其稳态值的 $1/e$ 时所需的时间。我们还观察到了当自泵浦光强度增加时,即在自泵浦光的建立过程中,晶体表面的反射光强度减弱的现象。

参 考 文 献

- 1 J. Rodriguez, A. Siahmakoun *et al.*, *Appl. Opt.*, **26**, 1732(1987)
- 2 岳学锋, 邵宗书 *et al.*, *光学学报*, **10**(7), 606(1990)
- 3 S. R. Montgomery, J. Y. Rice *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B 5**, 1775(1988)
- 4 J. Finberg, *Opt. Lett.*, **7**, 486(1982)
- 5 G. Salama, M. J. Miller *et al.*, *Opt. Commun.*, **59**, 417(1986)