

光折变晶体几何结构对自泵浦相位共轭特性影响的研究

王晓颖^{1,2} 石顺祥¹

(1 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2 西安工业学院数理系, 西安 710032)

摘要 基于 Cu:KNSBN 晶体的自泵浦相位共轭实验,研究了光折变晶体的几何结构对自泵浦相位共轭特性的影响,得到在入射角不变的情况下,随着入射位置的变化相位共轭光输出有最大值,几何结构不同最大值输出对应的位置不同. 并从理论上分析了晶体结构在双作用区自泵浦相位共轭机制中的作用,指出几何结构、入射位置与自泵浦光通道、耦合系数的关系及在自泵浦相位共轭效应中存在一个最佳入射光工作位置.

关键词 自泵浦相位共轭;扇形效应;光回路

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

由于自泵浦相位共轭具有极其诱人的特性,已在许多领域内获得了应用^[1~3],人们已对其物理机理进行了大量研究^[4~8]. 本文基于 Cu:KNSBN 晶体的自泵浦相位共轭实验,就光折变晶体几何结构对广泛采用的双作用区自泵浦相位共轭特性的影响进行了较深入的研究,得到了对实际工作有意义的结论.

1 实验装置

图 1 是自泵浦相位共轭的实验装置图. 波长为 488 nm 的 Ar⁺ 离子激光经半波片 P 后,相对于晶体 Cu:KNSBN 是 e 光入射;BS 为分束器;IR 为光阑;D₁、D₂ 为功率计;S₁ 为光开关;晶体放在三维转台上. 当进行自泵浦相位共轭实验时,S₁ 被打开.

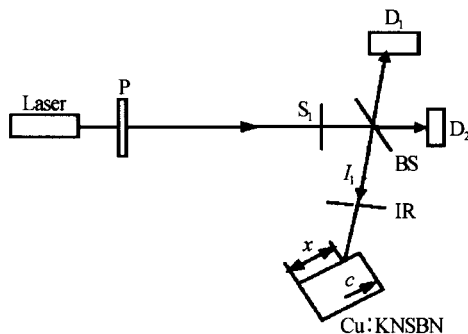


图 1 实验装置
Fig. 1 Schematic of the experimental

2 实验结果

实验中,入射光束自准直且其直径为 1 mm 左

右,以与光轴为一固定的夹角(实验中采用 $i=37^\circ$) 射入晶体. 实验时,晶体沿着光轴的方向移动,每次移动 0.25 mm,并且在任意位置每次进行自泵浦实验时,都是利用均匀光完全擦洗晶体后进行.

2.1 晶体 1 的实验结果

晶体的几何尺寸为 5 mm×5 mm×6 mm,光轴沿着 6 mm 棱边的方向,光束从 5 mm×6 mm 的侧面进入晶体,入射位置在 2.3 mm 至 4.05 mm 之间变化. 实验中,入射光进入晶体后发生扇开效应最终形成了直至底角的光通道,并产生自泵浦相位共轭光输出. 在 2.3 mm~3.8 mm 之间,晶体内的自泵浦相位共轭光通道(光回路)很稳定,相位共轭输出很稳定,且输出光较强. 在 4.05 mm~4.8 mm 之间,晶体里形成的自泵浦相位共轭光通道不稳定,相位共轭输出也不稳定,且输出较弱. 此时,伴随自泵浦相位共轭光通道还有其它方向的扇开光,因此输出相位共轭光的不稳定起因于扇开光与自泵浦相位共轭效应的竞争. 当入射位置小于 2.3 mm 或大于 4.8 mm 时,扇开光形不成光回路且无自泵浦相位共轭输出,晶体中充满扇开光. 图 2 给出了晶体 1 中自泵浦相位共轭光通道的部分照片,其中(a)、(b)、(c) 相应于 2.8 mm、3.55 mm、3.8 mm 时稳定的光通道,

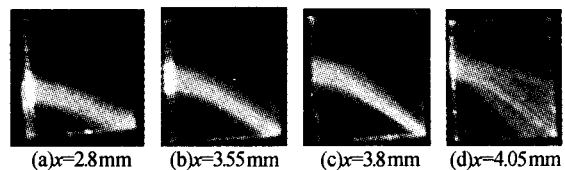


图 2 自泵浦相位共轭实验中,在不同位置入射时晶体 1 中的光路照片
Fig. 2 Photographs of the paths within the crystal 1 are shown at the entry position indicated

而(d)为不稳定光通道的情况. 为了与理论分析进行比较,表1列出了实验中相对每个人射位置光通道与

光轴夹角的测量数值. 图3(a)给出了自泵浦相位共轭反射率随入射位置变化的输出特性曲线.

表1 不同入射位置 x 下 β 的实验值

入射位置 x/mm	2.3	2.55	2.8	3.05	3.3	3.55	3.8	4.05	4.55	4.8	5.3	5.55
晶体1的 $\beta/^\circ$	64.2	62.1	59.0	57.0	54.3	53.2	49.4	47.3				
晶体2的 $\beta/^\circ$					62.1	60.0	57.6	56.0	52.3	49.6	47.5	46.5

位共轭反射率的输出特性类似,说明都有一个最佳的自泵浦相位共轭工作位置.

3 实验结果的分析

根据上述实验结果,对于自泵浦过程受晶体结构的影响进行理论分析.

3.1 入射位置对自泵浦相位共轭光通道的影响

当 e 光以固定角度 i 射入晶体时,将发生折射,其折射角为 α ,则由于扇形效应,扇开光扇开的角度(与光轴的夹角)是 $0 \sim \pi - \alpha$,扇开光经过 $-c$ 面反射后可能会与其他的扇开光形成回路. 如图5(a),在晶体中要形成回路就必须 $0 \leq d_1 < d$,即

$$\frac{l-h}{2x-(l+h)\tan\alpha} < \tan\beta \leq \frac{l-h}{x-h\tan\alpha} < \tan\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right) \quad (1)$$

其中, h 为光进入晶体后未发生扇开效应的距离, l 为晶体上表面的宽度. 由实验的光回路可看出,对于不同的晶体 h 的大小不同,但对于同一块晶体 h 基本上是相同的,晶体1的 h 约为 1 mm ,晶体2的 h 约为 2 mm . 根据图2及图4的实验光通道,光进入晶体后由于光扇效应和晶体的几何尺寸作用,最终形成了直至底角的光通道,如图5(b). 由图5可得到光通道与光轴的夹角满足如下关系

2.2 晶体2的实验结果

晶体的几何尺寸为 $6 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,光轴沿着 8 mm 棱边的方向,光从 $6 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的侧面入射进入晶体. 图4给出了入射光不同位置时晶体中的光路实验照片,其中(a)、(b)、(c)是稳定输出的光通道,(d)为不稳定时的光通道情况. 不同入射位置光通道与光轴夹角 β 的测量数值如表1. 晶体2的相位共轭反射率随入射位置的变化规律如图3(b).

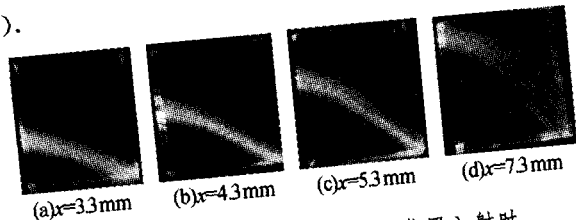


图4 自泵浦相位共轭实验中,在不同位置入射时晶体2中的光路的照片
Fig. 4 Photographs of the paths within the crystal 2 are shown at the entry position indicated

由以上二晶体的实验结果可见,对应于不同入射位置时的自泵浦相位共轭光通道状况,自泵浦相

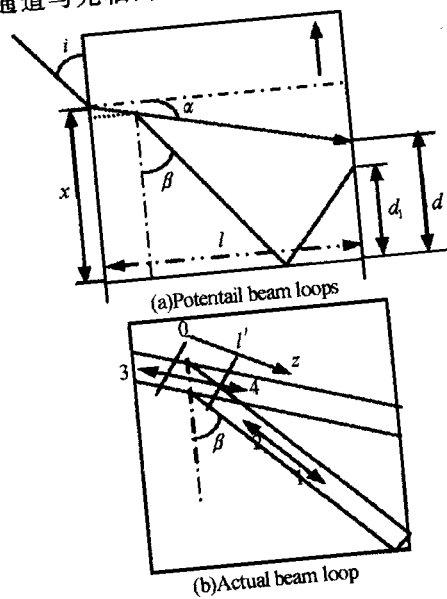


图5 晶体中形成回路的示意图
Fig. 5 A sketch of building beam loop

$$\tan \beta = \frac{l-h}{x-h \tan \alpha} < \tan \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \quad (2)$$

由该关系式可计算出晶体中不同入射位置相应

的 β 的值, 如表 2. 将表 2 中的计算值与表 1 中的测量值进行比较可见, 计算值与实验测量值基本一致.

表 2 不同入射位置 x 下 β 的理论值

入射位置 x/mm	2.3	2.55	2.8	3.05	3.3	3.55	3.8	4.05	4.55	4.8	5.3	5.55
晶体 1 的 $\beta/^\circ$	64.3	61.4	58.7	56.2	53.8	51.5	49.4	47.4				
晶体 2 的 $\beta/^\circ$					62.9	60.7	58.6	54.6	52.7	50.9	47.7	46.1

3.2 自泵浦相位共轭光通道对耦合系数的影响

对于光折变晶体, 各个方向上扇开光强度与光束耦合系数有关, 耦合系数越大扇开光强度越大. 光束耦合系数^[9]为

$$\gamma = \frac{ik}{2} \frac{\Delta n \exp(i\phi_g)}{\cos(\theta/2)} \quad (3)$$

式中, ϕ_g 是相位栅相对干涉条纹分布的空间相移, 在无外加电场时, $\phi_g = \frac{\pi}{2}$; $k = \omega/c$; θ 为入射光与扇开

光的夹角, 且 $\theta = 90^\circ - (\alpha + \beta)$; $\Delta n = -\frac{1}{2} n_0^3 r_{\text{eff}} E$, r_{eff} 为有效光电系数, E 为空间电场. 实验中, 入射光以与晶体 (Cu:KNSBN) 光轴夹角为 37° 的方向入射, 可计算得到耦合系数 γ 随扇开光方向 β (β 为扇开光与光轴的夹角) 的变化如图 6. 当 $\beta = 59^\circ$ 时, 耦合系数最大.

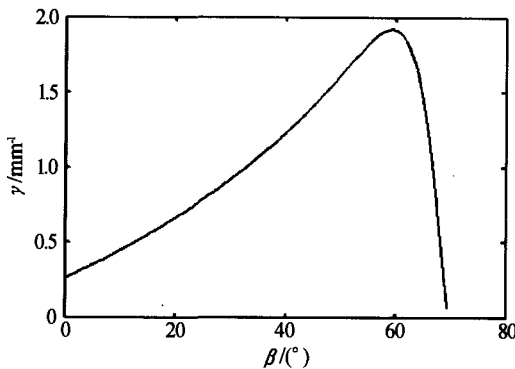


图 6 耦合系数 γ 随扇开光与光轴夹角 β 的变化
Fig. 6 The beam-coupling coefficient γ versus the angle of fanning beam β

3.3 不同入射位置对自泵浦相位共轭反射率的影响

对于图 5(b) 所示的 (双作用区) 自泵浦相互作用, 每一作用区都可以看作是一个四波混频, 其耦合方程为

$$\frac{dI_1}{dz} = \frac{2\gamma}{I_0} (I_1 I_4 + \sqrt{I_1 I_2 I_3 I_4}) \quad (4)$$

$$\frac{dI_2}{dz} = \frac{2\gamma}{I_0} (I_2 I_3 + \sqrt{I_1 I_2 I_3 I_4}) \quad (5)$$

$$\frac{dI_3}{dz} = -\frac{2\gamma}{I_0} (I_2 I_3 + \sqrt{I_1 I_2 I_3 I_4}) \quad (6)$$

$$\frac{dI_4}{dz} = -\frac{2\gamma}{I_0} (I_1 I_4 + \sqrt{I_1 I_2 I_3 I_4}) \quad (7)$$

上面方程忽略了晶体对光的线性吸收. 其中 I_4 是入射光, I_1 是扇开光, I_2 是扇开光经侧面和底面两次反射获得的与 I_1 传播方向相反的光, I_3 是 I_4 的相位共轭光, 且有 $I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$.

由式 (4)~(7) 可得

$$I_1 + I_4 = I_a \quad (8)$$

$$I_2 + I_3 = I_b \quad (9)$$

式中 I_a, I_b 是常量, 且 $I_0 = I_a + I_b$. 对式 (6)、(7) 进行变换, 并结合式 (8)、(9), 可得

$$\frac{dI_4}{\sqrt{I_4(I_a - I_4)}} = \frac{dI_3}{\sqrt{I_3(I_b - I_3)}} \quad (10)$$

对式 (10) 两边进行积分得

$$\arcsin \left(1 - \frac{2I_4}{I_a} \right) - \arcsin \left(1 - \frac{2I_3}{I_b} \right) = \Psi \quad (11)$$

令 $\phi = \arcsin \left(1 - \frac{2I_4}{I_a} \right)$, $\xi = \arcsin \left(1 - \frac{2I_3}{I_b} \right)$, 可将式 (8) 写为 $\phi - \xi = \Psi$, 即 $\phi = \Psi + \xi$. 由此可得

$$I_4 = \frac{I_a}{2} (1 - \sin \phi) \quad (12)$$

$$I_1 = \frac{I_a}{2} (1 + \sin \phi) \quad (13)$$

$$I_3 = \frac{I_b}{2} (1 - \sin \xi) \quad (14)$$

$$I_2 = \frac{I_b}{2} (1 + \sin \xi) \quad (15)$$

将式 (12)、(13)、(14)、(15) 代入式 (6), 得

$$\frac{d\xi}{dz} = \frac{2\gamma}{I_0} \left(\frac{I_b}{2} \cos \xi + \frac{I_a}{2} \cos \xi \cos \Psi - \frac{I_a}{2} \sin \xi \sin \Psi \right)$$

再令 $A = \frac{I_a}{2} \sin \Psi$, $B = \frac{I_b}{2} + \frac{I_a}{2} \cos \Psi$ 和 $\tan \varphi = \frac{A}{B}$, 上式可简化为

$$\frac{d\xi}{\cos(\varphi + \xi)} = \frac{2\gamma}{I_0} \sqrt{A^2 + B^2} dz \quad (16)$$

将式 (16) 积分, 可得

$$\xi = -\varphi - \frac{\pi}{2} + 2 \arctan \left[\left| \tan \left(\frac{\varphi + \xi'}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right| \cdot e^{-\frac{2\gamma}{I_0} \sqrt{A^2 + B^2} (l-z)} \right] \quad (17)$$

式中 l' 为作用长度, ξ_r 是与 $I_3(l')$ 相应的 ξ 值, $\xi_r = \arcsin \left(1 - \frac{2I_3(l')}{I_b} \right)$. 把式 (17) 代入 $\phi = \Psi + \xi$, 并结合 $I_4(0)$, 可求出 Ψ . 进而可以求出 I_1, I_2, I_3, I_4 .

在理论分析中, 考虑到真实的实验情况, 两个作

用区非常靠近,可近似看成是一个作用区;再由表 1、2 可知,在自泵浦相位共轭范围内, $45^\circ < \beta < 65^\circ$,因此扇开光在底面和侧面都发生全反射,就可以得到边界条件 $I_1(l')=I_2(l')$; $I_3(l')=0$; $I_1(0)=0$; $I_4(0)=I_a$. 对应的 $\xi_r = \frac{\pi}{2}$, $I_b(l')=I_2(l') = \frac{I_a}{2}(1 + \sin \phi_r)$. 结合表 2 中的 β 和式(3)及式(17)求出 Ψ ,再求出 I_3 、 I_4 ,即而得到相位共轭反射率 $R = \frac{I_3(0)}{I_4(0)}$. 图 7 给出了相应于不同入射位置的相位共轭反射率计算曲线,其中图 7(a)为晶体 1 的相位共轭反射率的计算曲线,图 7(b)为晶体 2 的相位共轭反射率的计算曲线. 将图 7 与图 3 对照可看出:除理论计算的 R 值略高于实验的 R 值外,理论计算曲线与实验曲线的变化趋势相同;对于每一块晶体而言都有一个最佳的入射位置,相应于该位置输出相位共轭反射率最大;不同几何结构的晶体最佳位置不同,对于晶体 1 而言 $x_{opt} = 2.8$ mm,对于晶体 2 而言 $x_{opt} = 3.8$ mm.

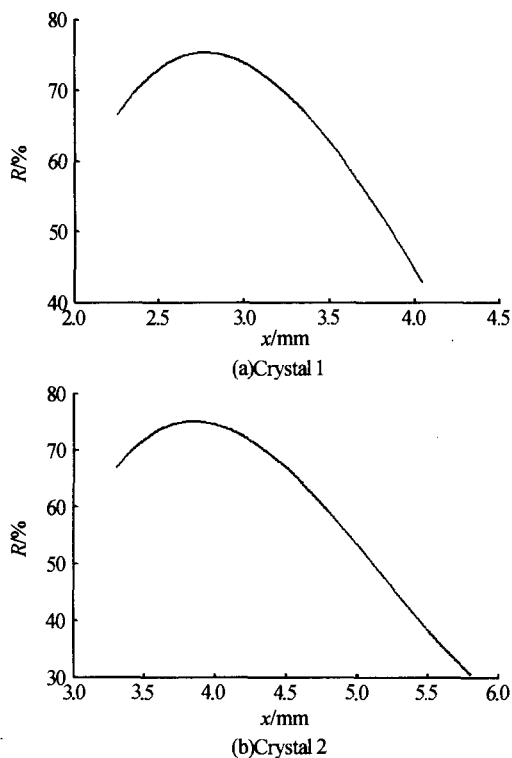


图 7 相位共轭反射率 R 随入射位置 x 的理论曲线
Fig. 7 Reflectivity of the phase conjugation beam versus the entry position x in the theory

5 结论

根据 Cu : KNSBN 晶体的自泵浦相位共轭实验,研究了光折变晶体的几何结构对自泵浦相位共

轭特性的影响,并从理论上分析了晶体结构在双作用区自泵浦相位共轭机制中的作用,指出在自泵浦相位共轭效应中存在一个最佳的工作位置. 这项研究对自泵浦相位共轭实际应用中,选择最佳入射位置提供了理论和实验依据.

参考文献

- 1 石顺祥,许海平,孙艳玲,等. 固体激光光折变自适应光外差探测技术研究. 光学学报,2002,22(12):1457~1460
Shi S X, Xu H P, Sun Y L, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002,22(12):1457~1460
- 2 吕国辉,范秀英,姜作宏,等. 用自泵浦相位共轭实现全光型半加器逻辑操作. 光电子·激光,2003,14(6):570~573
Liu G H, Fan X Y, Jiang Z H, et al. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003,14(6):570~573
- 3 Wang X, Sasaki O, Suzuki T, et al. Measurement of spatially nonuniform phase-changes of a light beam utilizing reflectivity characteristic mirror. *Opt Eng*, 1999,38(9):1553~1559
- 4 许海平,石顺祥,赵卫,等. Cu : KNSBN 晶体自泵浦与互泵浦相位共轭共存特性的实验研究. 光子学报,2002,31(5):588~591
Xu H P, Shi S X, Zhao W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002,31(5):588~591
- 5 刘继芳,李育林,忽满利. BaTiO₃ : Ce 自泵浦相位共轭产生机制随泵浦光斑尺寸的变化. 光子学报,1998,27(3):207~211
Liu J F, Li Y L, Hu M L. *Acta Photonica Sinica*, 1998,27(3):207~211
- 6 Wang H, Zhang J, Yoshikado S, et al. A selection equilibrium theory for "stimulated photorefractive backscattering and four-wave mixing" self-pumped phase conjugation. *Appl Phys B*, 1998,66(2):207~211
- 7 Lian Yingwu, Gao H, Ye Peixian, et al. Self-pumped phase conjugation with a new mechanism in using KTa_{1-x}Nb_xO₃ : Fe crystals. *Appl Phys Lett*, 1993,63(13):1745~1747
- 8 陈利菊,石顺祥,赵卫,等. 高速调制光自泵浦-互泵浦相位共轭共存实验研究. 光子学报,2003,32(8):940~942
Chen L J, Shi S X, Zhao W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(8):940~942
- 9 Cronin-Golomb M, Fischer B, White J O, et al. Theory and applications of four-wave mixing in photorefractive media. *IEEE J Quant Electr*, 1984, QE-20(1):12~19

Investigation of the Influence of the Crystal Geometry Configuration on Self-pumped Phase Conjugate Properties

Wang Xiaoying^{1,2}, Shi Shunxiang¹

¹ School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071

² Dept of Maths & Phys, Xi'an Inst of Tech, Xi'an 710032

Received date: 2004-11-23

Abstract Based on self-pumped phase conjugation experiment in Cu-doped KNSBN crystal, the influence of the photorefractive crystal geometry configuration on self-pumped phase conjugate properties was investigated. The maximum output configuration is funded in variety in the position. The different configuration carry with them corresponding maximum output position. The action of crystal geometry configuration on the two coupled interaction regions self-pumped phase conjugate mechanism was analyzed with theory. The relation between geometry configuration and incident position and beam path and beam-coupling coefficient was built. The optimal work position in self-pumped phase conjugation effect was given.

Keywords Self-pumped phase conjugation; Fanning effect; Beam loop



Wang Xiaoying was born in 1970, Shannxi Province. She received the B. S. degree from Northwest University in 1994. Now she is pursuing the M. S. degree in Xidian University and she is working as an instructor in Xi'an institute of technology. Her main research interests include photorefractive phase conjugation and optical information processing.