

文章编号: 0253-2239(2006)09-1382-5

晶体几何结构及入射角度对自抽运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: 基于两块不同尺寸的 Cu:KNSBN 晶体自抽运相位共轭实验,研究了光折变晶体的几何结构及入射角度对自抽运相位共轭特性的影响,得到在入射位置不变化的情况下,随着入射角度的变化相位共轭光输出有最大值,几何结构不同对应的最大值不同。并从理论上分析了晶体结构及入射角度在双作用区自抽运相位共轭机理中的作用,指出几何结构、入射角度与自抽运光通道、耦合系数的关系,及在自抽运相位共轭效应中存在一个最佳入射角度,这时相位共轭光输出最大。最后,对理论上的相位共轭反射率公式进行了修正。对自抽运相位共轭实际应用中,选择最佳入射角度提供了理论和实验依据。

关键词: 非线性光学; 最佳入射角度; 自抽运相位共轭; 扇形效应

中图分类号: O43 文献标识码: A

Investigation of Influence of Incident Angle and Crystal Geometrical Configuration on Self-Pumped Phase Conjugation Properties

Wang Xiaoying^{1,2} Shi Shunxiang¹

(¹ School of Technical Physics, Xidian University, Xian 710071)
(² Department of Maths & Physics, Xian Institute of Technology, Xian 710032)

Abstract: Based on self-pumped phase conjugation experiment in two blocks of Cu:KNSBN crystal, the influence of the incident angle and photorefractive crystal geometrical configuration on self-pumped phase conjugation properties is investigated. The maximum output of phase conjugation is found with variety in the incident angle for the same incident position. The different configurations determine different maximum output. The action of crystal geometrical configuration and incident angle in dual active regions self-pumped phase conjugation mechanism is analyzed theoretically. The relation between geometrical configuration and incident angle and self-pumped beam path and beam-coupling coefficient is built. The optimal incident angle for maximum output of phase conjugation light is given in self-pumped phase conjugation effect. Finally, the formula of reflectivity of phase conjugation beam is modified. The research lays foundation of theory and experiment for selecting the optimal incident angle in fact.

Key words: nonlinear optics; optimal incident angle; self-pumped phase conjugation; fanning effect

1 引 言

由于光折变晶体的自抽运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^[1~5],人们也已对其物理机理进行了大量的研究^[6~10]。但是据作者所知,至今尚未有关于晶体的几何结构对自抽运相位共轭特性影响的研究报道。根据作者的实际

工作需要,基于 Cu:KNSBN(掺铜铌酸钾钠锆钽)晶体的自抽运相位共轭实验,就光折变晶体几何结构及入射角度对广泛采用的双作用区自抽运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。

* 国防部委基金(51402030101DZ01)资助课题。

作者简介: 王晓颖(1970~),女,陕西西安人,西安工业学院数理系讲师,西安电子科技大学硕士研究生,主要从事光折变晶体相位共轭的研究和物理学教学改革。E-mail: wuliwangxy@163.com

收稿日期: 2005-04-29; 收到修改稿日期: 2005-10-10

2 实验装置

图 1 是自抽运相位共轭的实验装置图。图中, 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。当进行自抽运相位共轭实验时, S₁ 被打开。

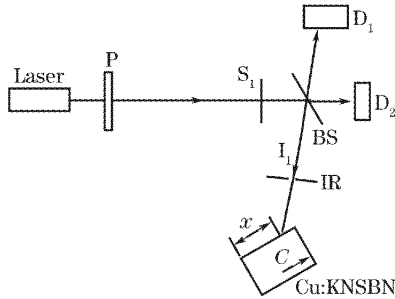


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果

在实验中, 入射光束自准直且其直径为 1 mm 左右, 以某一固定位置射入晶体。实验时, 晶体绕着光轴的方向旋转, 每次入射角度改变 5°, 并且在任何入射角度进行自抽运实验时, 都是利用均匀光完全擦洗晶体后进行。

3.1 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, 入射角度(为方便描述, 本文取入射光线与光轴的夹角)在 25°至 45°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, 并产生自抽运相位共轭光输出。晶体内的自抽运相位共轭光通道很稳定, 相位共轭输出很稳定, 且输出光较强。图 2 给出了晶体 1 中自抽运相位共轭光通道的部分照片, 分别相应于入射角度为 25°、30°、35°、40°时稳定的光通道。为了与理论分析进行比较表 1 列出了实验中相对每一入射角度形成的光通道与光轴夹角 β 的测量数值。图 3(a) 给出了晶体 1 中自抽运相位共轭反射率 R 随入射角度 i 的输出特性实验曲线。

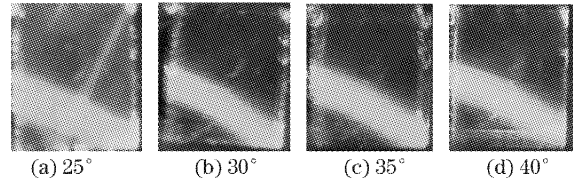


图 2 不同入射角度时晶体 1 中的光路照片

Fig. 2 Photographs of the light paths within the crystal 1 for different incident angles

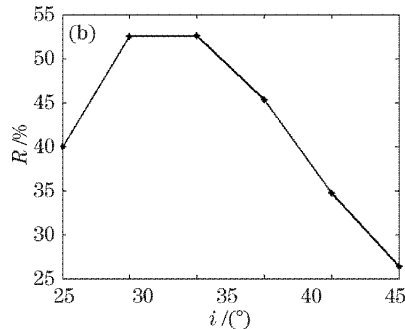
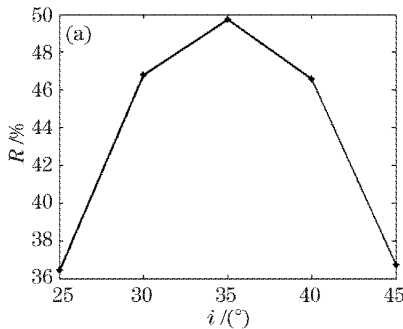


图 3 相位共轭反射率 R 随入射角度 i 的实验曲线。(a) 晶体 1, (b) 晶体 2

Fig. 3 Reflectivity of phase conjugation beam versus the incident angle i in the experiment. (a) Crystal 1, (b) crystal 2

表 1 不同入射角度 i 下的实验值

Table 1 Value of correspond different incident angle i

$i / (^\circ)$	20	25	30	35	40	45
Crystal 1 $\beta / (^\circ)$	62	61.5	61.2	61	60	
Crystal 2 $\beta / (^\circ)$	60	59.5	59	58	57.5	57

3.2 晶体 2 的实验结果

晶体的几何尺寸为 6 mm×7 mm×8 mm, 光轴沿着 8 mm 棱边的方向, 光从 6 mm×8 mm 的侧面入射进入晶体, 图 4 给出了入射光不同入射角度时晶体中的光路实验照片。不同入射角度光通道与光

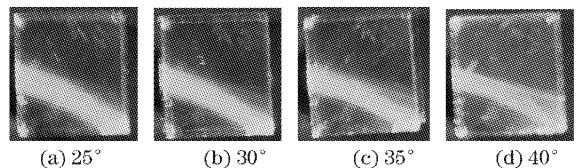


图 4 不同入射角度时晶体 2 中的光路的照片

Fig. 4 Photographs of the light paths within the crystal 2 at different incident angles

轴夹角 β 的测量数值如表 1 所示。晶体 2 的相位共轭反射率随入射角度的变化规律如图 3 (b) 所示。

由以上二晶体的实验结果可见,相应于不同入射角度时的自抽运相位共轭光通道状况,自抽运相位共轭反射率的输出特性类似,说明都有一个最佳的自抽运相位共轭工作入射角度。

4 实验结果的分析

根据上述实验结果,我们对于自抽运过程受晶体结构的影响进行理论分析。

4.1 入射角度对自抽运相位共轭光通道的影响

当 e 光以入射角度 i 射入晶体时,将发生折射,其折射角为 α ,则由于扇形效应,扇开光的角度(与光轴的夹角)是 $0 \sim \pi/2 - \alpha$,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)所示,在晶体中要形成回路就必须 $0 \leq d_1 < d$ 。

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

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,光进入晶体后由于扇形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) 所示。由图 5 可得到光通道与光轴的夹角满足如表 2。

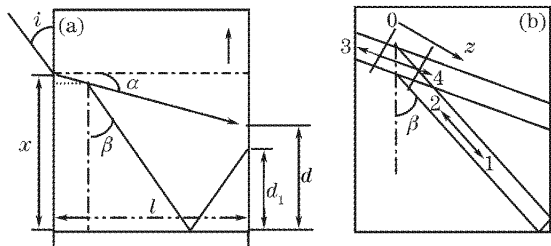


图 5 晶体中形成回路的示意图。(a)晶体 1,(b)晶体 2
Fig. 5 Sketch of beam loop in (a) crystal 1 (b) crystal 2

表 2 不同入射角度 i 下的理论计算值

Table 2 Theoretical value of β corresponding to incident angle i

Incident angle $i / (^\circ)$	β in crystal 1 $/ (^\circ)$	β in crystal 2 $/ (^\circ)$
20	61.5504	59.9144
25	61.3036	59.5910
30	61.0246	59.2117
35	60.7181	58.7843
40	60.3887	58.3165
45		57.8160

4.2 自抽运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^[11]为

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

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, $\phi_g = \pi/2$; $k = \omega/c$; θ 为入射光与扇开光的夹角,且 $\theta = 90^\circ - (\alpha + \beta)$; $\Delta n = -\frac{1}{2}n_o^3 r_{\text{eff}} E$, 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 i 的方向入射,且入射角度 i 在 $0 \sim \pi/2$ 之间,光射入晶体中发生折射,折射光的方向与光轴的夹角约为 $64^\circ \sim 90^\circ$ 。由此可计算得到不同入射角度情况下,耦合系数随扇开光方向 β (β 为扇开光与光轴的夹角) 的变化如图 6 所示。

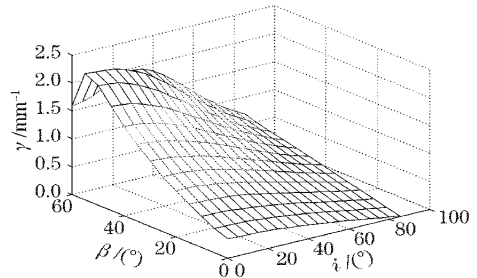


图 6 在不同入射角度 i 的情况下,耦合系数 γ 随扇开光与光轴夹角 β 的变化

Fig. 6 Beam-coupling coefficient γ versus angle of fanning beam β at different incident angles

4.3 不同入射角度对自抽运相位共轭反射率的影响

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

$$\frac{dI_1}{dz} = \frac{2\gamma}{I_0} (I_1 I_4 + \sqrt{I_1 I_2 I_3 I_4}), \quad (3)$$

$$\frac{dI_2}{dz} = \frac{2\gamma}{I_0} (I_2 I_3 + \sqrt{I_1 I_2 I_3 I_4}), \quad (4)$$

$$\frac{dI_3}{dz} = -\frac{2\gamma}{I_0} (I_2 I_3 + \sqrt{I_1 I_2 I_3 I_4}), \quad (5)$$

$$\frac{dI_4}{dz} = -\frac{2\gamma}{I_0} (I_1 I_4 + \sqrt{I_1 I_2 I_3 I_4}), \quad (6)$$

上面方程是忽略晶体对光的线性吸收。其中 I_4 是入射光, I_1 是扇开的光, 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 $I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$ 。

由以上四个方程式可得

$$I_1 + I_4 = I_a, \quad (7)$$

$$I_2 + I_3 = I_b, \quad (8)$$

其中 I_a, I_b 是常量, 且 $I_0 = I_a + I_b$ 。对(5)式、(6)式进行变换, 并结合(7)式、(8)式, 可得

$$\frac{dI_4}{\sqrt{I_4(I_a - I_4)}} = \frac{dI_3}{\sqrt{I_3(I_b - I_3)}}, \quad (9)$$

对上式两边进行积分得

$$\arcsin\left(1 - \frac{2I_4}{I_a}\right) - \arcsin\left(1 - \frac{2I_3}{I_b}\right) = \psi, \quad (10)$$

令 $\phi = \arcsin\left(1 - \frac{2I_4}{I_a}\right), \xi = \arcsin\left(1 - \frac{2I_3}{I_b}\right)$, 可将

(10) 式写为 $\phi - \xi = \psi$, 即 $\phi = \psi + \xi$ 。由此可得

$$I_4 = \frac{I_a}{2}(1 - \sin \phi), \quad (11)$$

$$I_1 = \frac{I_a}{2}(1 + \sin \phi), \quad (12)$$

$$I_3 = \frac{I_b}{2}(1 - \sin \xi), \quad (13)$$

$$I_2 = \frac{I_b}{2}(1 + \sin \xi), \quad (14)$$

将(11)式~(14)式代入(6)式, 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

$$\frac{d\xi}{\cos(\varphi + \xi)} = \frac{2\gamma}{I_0} \sqrt{A^2 + B^2} dz, \quad (15)$$

将(15)式积分, 可得

$$\xi = -\varphi - \frac{\pi}{2} + 2 \arctan \left\{ \left| \tan \left(\frac{\varphi + \xi'}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right| \times \exp \left[-\frac{2\gamma}{I_0} \sqrt{A^2 + B^2} (l' - z) \right] \right\}, \quad (16)$$

其中 l' 为作用长度, ξ' 是与 $I_3(l')$ 相应的 ξ 值, $\xi' = \arcsin \left[1 - \frac{2I_3(l')}{I_b} \right]$ 。把(17)式代入 $\phi = \psi + \xi$, 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, 可近似看成一个作用区; 再由表 1、2 可知, 在自抽运相位共轭范围内, $45^\circ < \beta < 65^\circ$, 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 $\xi_l = \pi/2, I_b(l') = I_2(l') = \frac{I_a}{2}(1 + \sin \phi_l)$ 。结合表 2 中的 β 和(2)式及(16)式求出 ψ , 再求出 I_3, I_4 , 即而得到相位共轭反射率 $R = I_3(0)/I_4(0)$ 。

4.4 相位共轭反射率的修正

如图 7 所示为自抽运相位共轭反射率的各束光

强示意图。

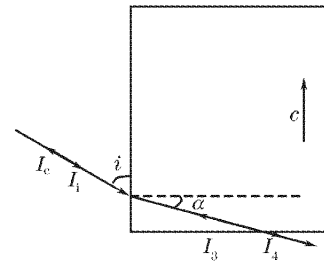


图 7 自抽运相位共轭反射率的各束光示意图

Fig. 7 Sketch of beams in reflectivity of phase conjugation beam

在实验中, 自抽运相位共轭反射率 R 的测量公式为

$$R = I_c/I_i, \quad (17)$$

其中 I_i 为入射到晶体表面的光束强度, I_c 为输出到晶体外部的相位共轭光的强度。理论上自抽运相位共轭反射率定义为

$$R = I_3(0)/I_4(0), \quad (18)$$

其中 $I_3(0)$ 为晶体内四波混频作用区端面处的相位共轭光, $I_4(0)$ 为晶体内四波混频作用区端面处的入射光的强度。显然, 相位共轭光反射率的测量定义和理论定义不同。由物理光学^[12]得 e 光在界面的菲涅耳反射率为

$$R_e = \frac{\tan^2(90^\circ - i - \alpha)}{\tan^2(90^\circ - i + \alpha)}, \quad (19)$$

可以看出, 晶体表面的反射率随入射角度发生变化。当入射光 I_i 射入晶体表面时, 一部分光反射, 一部分光透射, 所以 $I_4(0) = I_i \cdot (1 - R_e)$; 同理对于相位共轭光也满足 $I_c = I_3(0) \cdot (1 - R_e)$ 这个关系。所以我们在应用中应该考虑到理论计算出的相位共轭反射率的修正。我们把(18)式改写为

$$R = \frac{I_3(0)}{I_4(0)}(1 - R_e)^2, \quad (20)$$

由(20)式求得对于我们所研究的不同入射角度相位共轭光反射率的变化情况, 如图 8 所示, 其中图 8(a)为晶体 1 当入射位置为 2.6 mm 时不同入射角度的相位共轭反射率的计算曲线, 图 8(b)为晶体 2 当入射位置为 3.8 mm 时不同入射角度的相位共轭反射率的计算曲线。将图 8 与图 4 相对照可看出: 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角度, 相应于该射入角度输出相位共轭反射率最大; 不同几何结构的晶体最佳入射角度不同, 对于晶体 1 而言 $i_{opt} = 35^\circ$, 对于晶体 2 而言 $i_{opt} = 30^\circ$ 。

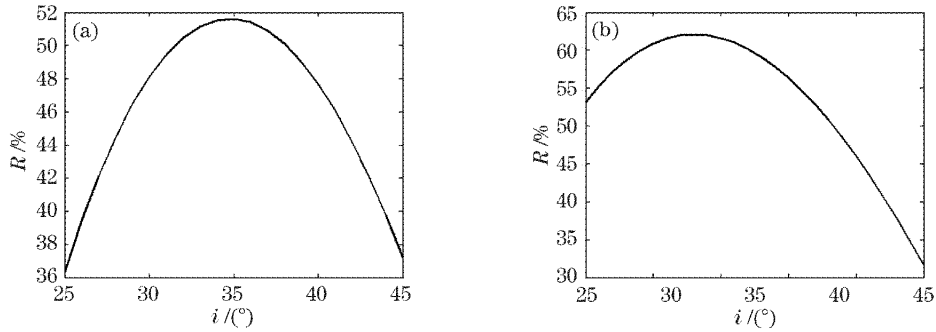


图 8 相位共轭反射率 R 随入射角度 i 的理论曲线。(a)晶体 1,(b)晶体 2

Fig. 8 Reflectivity of phase conjugation beam versus the incident angle i in theory for (a) crystal 1, (b) crystal 2

5 结 论

根据 $\text{Cu}:\text{KNSBN}$ 晶体的自抽运相位共轭实验,研究了光折变晶体的几何结构及入射角度对自抽运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抽运相位共轭机理中的作用,指出在自抽运相位共轭效应中存在一个最佳的工作角度。这项研究对自抽运相位共轭实际应用中,选择最佳入射角度提供了理论和实验依据。

参 考 文 献

- 1 Shi Shunxiang, Xu Haiping, Sun Yanling *et al.*. Study of solid-state laser photorefractive adaptive optical heterodyne detection technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1457~1460 (in Chinese)
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[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1457~1460
- 2 Lü Guohui, Fan Xiuying, Jiang Zuohong *et al.*. Realizing all-optical half-adder logic operation with self-pumped phase conjugation[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(6): 570~573 (in Chinese)
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[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(6): 570~573
- 3 Wang X, Sasaki O, Suzuki T *et al.*. Measurement of spatially no uniform phase-changes of a light beam utilizing reflectivity characteristic mirror[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**: 1553~1559
- 4 Guo Siji, Wang Jiayou, Wang Lijun *et al.*. Experimental study on laser beam passed a disturbed thermal blooming cell using SPPC[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(2): 171~174 (in Chinese)
过巳吉,汪家友,王立军等. 利用自泵浦相位共轭器对热晕池的扰动激光束的实验研究[J]. *光学学报*, 1997, **17**(2): 171~174
- 5 Sun Xiudong, Zhou Zhongxiang, Li yan *et al.*. Real-time optical image processing using induced mutually-pumped phase

conjugator[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(2): 223~224 (in Chinese)

孙秀冬,周忠祥,李炎等. 应用诱导互泵浦相位共轭镜的适时图像处理[J]. *光学学报*, 1996, **16**(2): 223~224

- 6 Li Xiaoli, Shi Shexiang, Zhao Wei. Investigation of SPPC for pulse signal beams based on preset grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 499~502 (in Chinese)

李晓莉,石顺祥,赵卫. 利用预制光栅的脉冲信号光自泵浦相位共轭特性的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 499~502

- 7 Xu Haiping, Shi Shunxiang, Zhao Wei *et al.*. Investigation into self-pumped and mutually pumped phase conjugation coexisting in $\text{Cu}:\text{KNSBN}$ crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5): 588~591 (in Chinese)

许海平,石顺祥,赵卫等. $\text{Cu}:\text{KNSBN}$ 晶体自抽运与互抽运相位共轭共存特性的实验研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(5): 588~591

- 8 Xu Xinguang, Mu Xiaodong, Shao Zongshu *et al.*. Study on self-built optical path production in Ce-doped BaTiO_3 stimulated photorefractive scattering self-pumped phase conjugator[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(7): 840~844 (in Chinese)

许心光,牟晓东,邵宗书等. $\text{Ce}-\text{BaTiO}_3$ 晶体自泵浦相位共轭特性和机理研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(7): 840~844

- 9 Wang H., Zhang J., Yoshikado S. *et al.*. A selection equilibrium theory for "stimulated photorefractive backscattering and four-wave mixing" self-pumped phase conjugation[J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **66**: 207~211

- 10 Xu X., Wang Z., Yang X *et al.*. Photorefractive properties and self-pumped phase conjugation in a series of BaTiO_3 crystals[J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **73**: 223~226

- 11 Cronin-Golomb M., Fischer B., White J. O. *et al.*. Theory and applications of four-wave mixing in photorefractive media[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(1): 12~29

- 12 Shi Shunxiang, Zhang Haixing, Liu Jinsong. *Physical Optics and Applied Optics* [M]. Xi an: Xidian University Press, 2000. 31 (in Chinese)

石顺祥,张海兴,刘劲松. 物理光学及应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. 31