

# 晶轴与晶面成 $18^\circ$ 角的 Ce·KNSBN 晶体 自泵浦位相共轭\*

余有龙<sup>1</sup> 范秀英<sup>2</sup> 姜作宏<sup>2</sup> 耿淑伟<sup>3</sup> 董孝义<sup>1</sup> 雷明亮<sup>2</sup>

- 1, 南开大学现代光学研究所, 天津 300071
- 2, 黑龙江大学信息与电子科学系, 哈尔滨 150080
- 3, 哈尔滨建筑大学建工学院, 哈尔滨 150001

姜全忠 陈焕鑫

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

**摘 要** 分析了晶体的不同切割方式对形成自泵浦位相共轭输出的影响, 报道了晶轴与晶面成  $18^\circ$  角的 Ce·KNSBN 晶体自泵浦位相共轭输出特性, 实验证实了共轭反射率与入射角和入射位置有关, 并得到反射率为 57.16% 的共轭输出。共轭光的形成时间随入射光强的增大而缩短。

**关键词** 自泵浦位相共轭, Ce·KNSBN 晶体。

## 1 引 言

近年来位相共轭现象的研究一直是非线性光学领域十分活跃的课题。1982 年继 White 等人成功地设计出外腔式自泵浦位相共轭器件后<sup>[1]</sup>, Feiberg 利用单束光射入一光折变单轴晶体, 实现了全内反射式反射率达 30% 的自泵浦位相共轭输出<sup>[2]</sup>, 并提出双区域耦合模型来解释该现象<sup>[3]</sup>。自泵浦位相共轭因能够自动选择其泵浦光的空间取向, 并以最佳方式与入射光束相互耦合, 输入输出波前间严格的共轭关系不会受到外界因素的干扰, 具有自启动和消位相畸变的功能, 无需外加泵浦光束可以大大减少由于过多光学元件的引入而引起不必要的能量损耗, 并考虑体积小、操作方便, 因此该技术对集成光学以及光计算的发展具有重要意义, 并越来越受到学者们的重视。在 BaTiO<sub>3</sub><sup>[2]</sup>、SBN<sup>[4, 5]</sup>、KNbO<sub>3</sub><sup>[6]</sup>、KNSBN<sup>[7-9]</sup> 及它们的掺杂晶体中已先后观察到自泵浦位相共轭输出现象。

通常用来得到自泵浦共轭波前的多为正常切割的正六面体晶体, 这种切割的 Ce·KNSBN 晶体, 其环形腔自泵浦位相共轭和全内反射自泵浦位相共轭输出现象已有报道, 两者的共轭反射率最高分别为 25% 和 40%<sup>[8, 7]</sup>。本文报道了一种非正常切割的 Ce·KNSBN 正六面体晶体的自泵浦位相共轭输出现象, 分析了晶体的不同切割方式对共轭输出的影响, 解释了

\* 黑龙江省自然科学基金和国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 12 月 12 日; 收到修改稿日期: 1997 年 2 月 27 日

所使用的光轴与晶体表面成 18°夹角的晶体有较高共轭反射率的原因。本文还给出所用晶体的共轭反射率随入射角、入射位置变化关系以及共轭光的形成时间随入射光强变化关系的实验结果。

## 2 理论分析

根据自泵浦位相共轭理论, 光折变晶体的耦合系数为<sup>[3]</sup>

$$\gamma = \frac{w r_{\text{eff}} E}{2nc \cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}} \quad (1)$$

其中  $c$  为光速,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为区域 1 中入射光的折射光束和泵浦光束与晶体轴线间的夹角,  $r_{\text{eff}}$  为有效电光系数,  $e$  光照射时四方晶系晶体的  $r_{\text{eff}}$  为

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

而  $o$  光照射时有效电光系数  $r_{\text{eff}}$  为

$$r_{\text{eff}} = n_0^4 r_{13} \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (3)$$

(1) 式中的  $E$  是与空间电荷密度有关的量, 其表达式为

$$E = \frac{k_B T k_g \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{q[1 + (\frac{k_g}{k_0})^2]} \quad (4)$$

式中

$$k_0 = \sqrt{\frac{Nq^2}{\epsilon_0 \epsilon T k_B}} \quad (5)$$

$$k_g = \frac{4\pi n \sin \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}}{\lambda} \quad (6)$$

$k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $N$  为有效电荷密度,  $q$  为电子电量。

掺杂浓度为 0.02 Wt% 的 Ce·KNSBN 晶体的电光系数值分别为  $r_{13} = 50 \times 10^{-12}$  m/V,  $r_{42} = 580 \times 10^{-12}$  m/V,  $r_{33} = 270 \times 10^{-12}$  m/V, 较大的  $r_{42}$  和  $r_{33}$  决定了  $e$  光照射时 Fanning 效应<sup>[10]</sup>较  $o$  光照射时要强得多, 因此  $e$  光较  $o$  光更易产生自泵浦位相共轭输出。

该晶体的其它各参数值分别为  $n_0 = 2.30$ ,  $n_e = 2.27$ ,  $\epsilon_{//} = 170$ ,  $\epsilon_{\perp} = 750$ 。取  $\lambda = 514.5$  nm,  $k_B = 1.381 \times 10^{-23}$  J/K,  $T = 293$  K,  $N = 2.5 \times 10^{22}$  m<sup>-3</sup>,  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C, 则可以画出  $e$  光照射时由(1) ~ (6) 式所确定的  $\alpha_1$  取不同值时  $\gamma$  随  $\alpha_2$  变化关系的理论曲线[见图 1(a) 所示]。不难看出, 当  $\alpha_2 = 36^\circ$  时可能取得最大值, 图 1(b) 则反映了  $\alpha_2 = 36^\circ$  时  $\gamma$  对  $\alpha_1$  的依赖关系。

图 2(a) 所示的为常见切割方式得到的晶体, 其晶轴与各表面相互垂直或平行; 另外一种切割方式得到的晶体, 其晶轴方向不变,  $a$  面斜切<sup>[8]</sup>使得  $\Omega$  成为锐角[见图 2(b) 所示]; 图 2(c) 所示的晶体对应第三种切割方式, 这种切割的正六面体晶体, 其晶轴偏离正常方向  $\beta$  角, 即晶轴与一对晶面成  $\beta$  角。

图 2(b) 所示的晶体在形成自泵浦输出时, 折射光束经内反射后充当泵浦光, 它只有一个作用区域, 属于环形腔自泵浦位相共轭范畴。它比图 2(a) 所示的猫式自泵浦位相共轭容易获

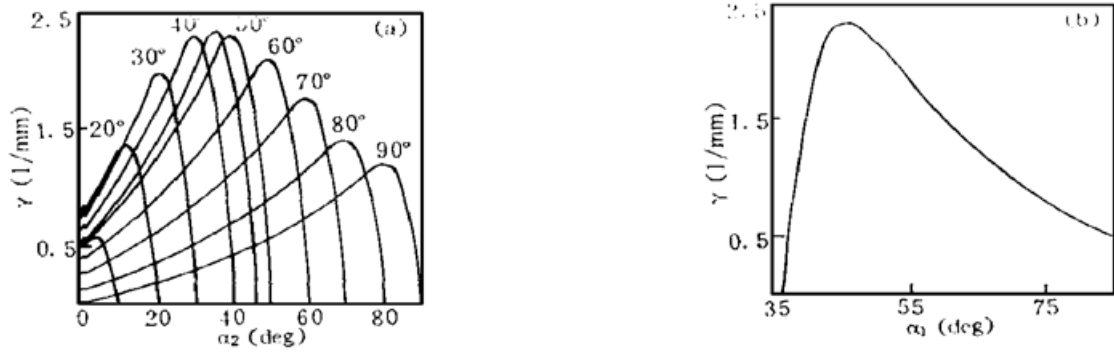


Fig. 1 Plots of the coupling constant (a)  $Y$  versus  $\alpha_2$  for various values of  $\alpha_1$ , (b)  $Y$  versus  $\alpha_1$  with  $\alpha_2 = 36^\circ$

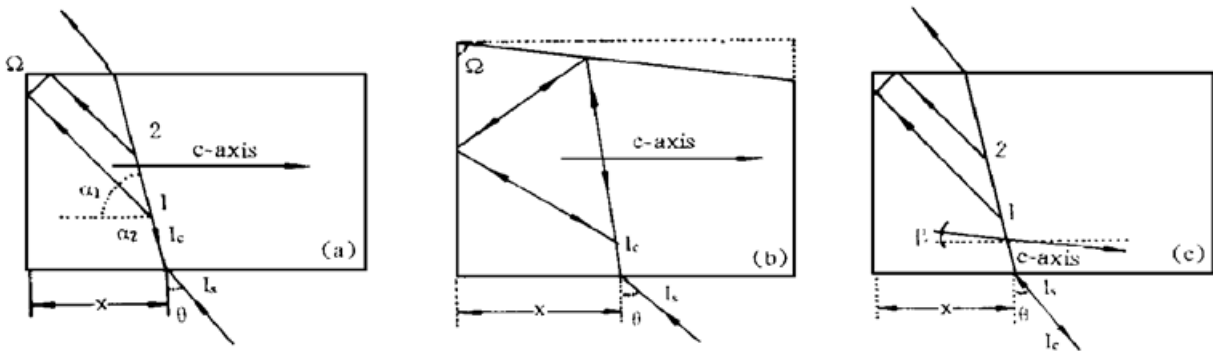


Fig. 2 Schems of different kind self-pumped phase conjugators.

(a) Cat phase conjugator with two interaction regions of four-wave mixing, (b) Phase conjugator with one interaction region of four-wave mixing within a titled-cut crystal, (c) Phase conjugator with two interaction regions of four-wave mixing within a crystal with an angle  $\beta$  between C-axis and crystal surface

得，后者在晶体内有两个相互作用的四波混频区域(1 和 2)。对同样入射条件的同一入射光束，图 2(c) 与图 2(a) 所示的晶体，其折射光和散射光相对于晶面的取向基本相同，但由于两者的晶轴取向不一致，使得二者在不同方向上的耦合程度不同，进而造成散射光的能量分布有所区别。

通过计算， $\alpha_2$  在  $21.2^\circ \sim 52.5^\circ$  范围内，若适当选择  $\alpha_1$  的角度， $Y$  值均超过  $2 \text{ mm}^{-1}$ 。 $\alpha_2 = 36^\circ$ 、 $\alpha_1 = 46^\circ$  时对应最佳耦合。实现全内反射自泵浦位相共轭时，若要得到最大强度的共轭输出，必须使得散射光的扇斑中能量最强的部分用来充当泵浦光，它对应  $\alpha_1 = 46^\circ$  时散射光中  $\alpha_2 = 36^\circ$  的部分。该晶体的临界角为  $26^\circ$ ，它要求  $64^\circ < \alpha_1 < 90^\circ$ ，显然  $\alpha_1 = 46^\circ$  不在此范围中，可见正常切割的 Ce·KNSBN 晶体得不到最大强度的共轭输出。如果晶轴偏离正常方向  $18^\circ$  以上(即  $\beta \geq 18^\circ$ )，则  $\alpha_1$  就能够满足要求，只要晶体的尺寸足够大，其散射光中  $\alpha_2 = 36^\circ$  的部分就满足形成全内反射自泵浦的条件，此时便能得到较大强度的共轭输出。若偏离的角度太大，要求沿光束传播方向的晶体尺寸大，考虑实际使用的晶体对光有一定的吸收，从而导致能量损耗的增加，显然这也不利于提高共轭反射率。综合考虑， $\beta = 18^\circ$  时所得到的耦合输出应该最强。

### 3 实验结果

实验中所使用的 Ce·KNSBN 晶体的尺寸为  $7.95 \text{ mm} \times 6.30 \text{ mm} \times 5.25 \text{ mm}$ ，Ce 离子的

掺杂浓度为 0.02 Wt%，晶轴与 7.95 mm × 5.25 mm 的面成 18°夹角，激光器工作波长为 514.5 nm，其偏振方向垂直于台面。为了保证入射光为 e 光，实验中使用半波片，结合起偏器，并保持晶轴平行于台面。

实验装置如图 3 所示，λ/2 为半波片，P 为起偏器，ND 为衰减器，它可改变系统的入射光强 I，并削弱共轭光在晶体和激光器端镜间的振荡，从而保证系统光强的相对稳定。BS 为分束器，D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub> 为探测器，两者探测的信号提供给双笔 X-Y 记录仪，I<sub>s</sub>、I<sub>c</sub> 分别为入射光强和共轭光强，I'<sub>c</sub> 为 I<sub>c</sub> 在 BS 处的反射光强，I' 为 I 在 BS 处的反射光强，则位相共轭反射率为

$$R = \frac{I_c}{I_s} \times 100\% = \frac{I'_c}{I'(1-r)} \times 100\% \quad (7)$$

其中 r 为分束镜的反射率(未考虑分束器的吸收)。通过实验得出如下结果:

1) 共轭反射率随入射角的变化关系

实验中保持入射光强 I<sub>s</sub> = 0.8 W/cm<sup>2</sup> 不变，改变入射角度，对同一入射位置，发现有不同强度的共轭光输出。即共轭反射率是角度的函数。图 4 便是 x = 2.15 mm 时反射率 R 对入射角 θ 变化关系的实验曲线，曲线表明当 θ = 45° 时，R 达到最大值，R<sub>max</sub> = 53.69%。

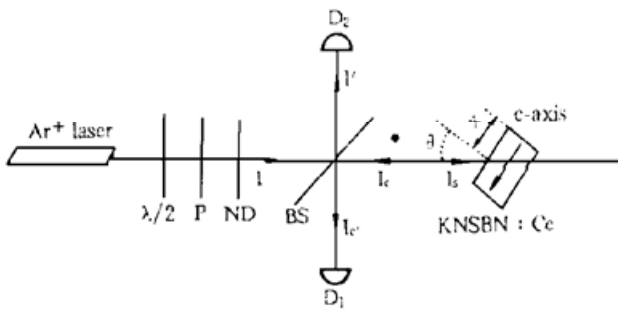


Fig. 3 Experimental setup for measuring the reflectivity of self-pumped phase conjugation

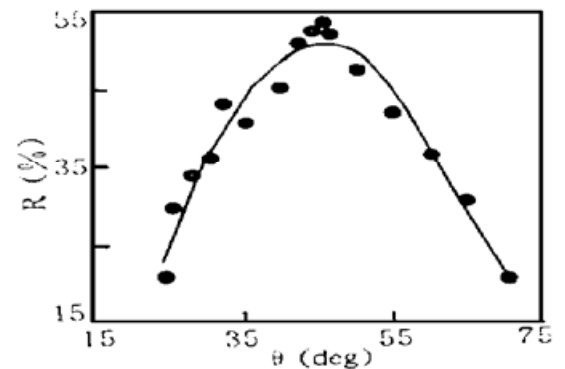


Fig. 4 Experimental plot of reflectivity versus the incident angle

2) 共轭反射率随入射位置的变化关系

同一入射光强下保持固定的入射角，改变光束的入射位置，同样也能观察到有不同强度的共轭输出，图 5 为保持入射光强 I<sub>s</sub> = 0.8 W/cm<sup>2</sup>、入射角 θ = 45° 不变时 R 对 x 依赖关系的实验曲线，可以看出当 x = 2.35 mm 时，共轭反射率取得最大值，其值为 R<sub>max</sub> = 57.16%。

同正常切割时造成晶体自泵浦位相共轭反射率与入射角、入射位置变化关系的原因<sup>[11]</sup>一样，只不过切割方式的不同会引起各自的共轭反射率所对应的最佳入射角、最佳入射位置有所差别而已。因此只有选择适当的入射角和入射位置，才能获得较高的位相共轭反射率。

显然本文所使用的晶体较文献[7]中介绍的正常切割的同种晶体有更高的共轭反射率，可见晶轴方向的适当偏离有利于共轭性能的提高。

3) 自泵浦位相共轭响应时间与入射光强的关系

I<sub>s</sub> 入射到晶体中，开始没有共轭光输出，随着 Fanning 效应的加强，共轭光逐渐形成，并趋于稳定。定义从入射光照射开始到共轭光强达稳定值的 1 - e<sup>-1</sup> 倍时所需时间为自泵浦位相共轭的响应时间(τ)。实验中观察到 τ 与入射光强有关，图 6 便是 x = 2.1 mm、θ = 45° 时的实验结果。直线 τ = 13.09I<sub>s</sub><sup>-1.18</sup> 较好地拟合了这些实验点，看来增大入射光强是缩短响应时间的重要手段。

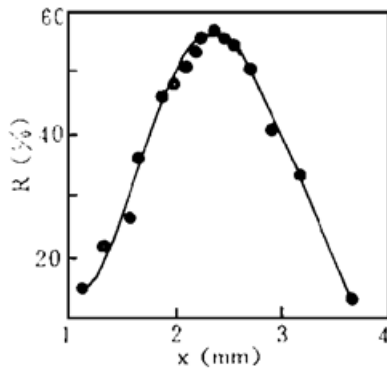


Fig. 5 Experimental plot of reflectivity versus the incident position

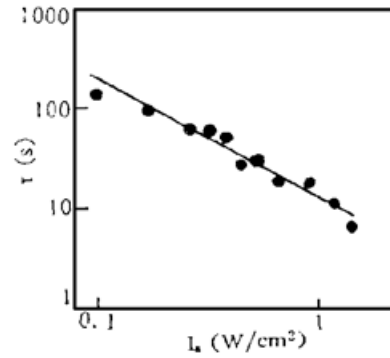


Fig. 6 Experimental plot of the response time of phase conjugate wave versus the incident intensity

随着入射强度的减小,  $\tau$  迅速增加并趋于无穷大, 称此强度的  $I_s$  为形成自泵浦位相共轭输出的阈值光强(记作  $I_{sth}$ )。造成这种现象的原因是由于实际使用的晶体都有一定的吸收, 低于阈值强度的入射光的 Fanning 效应中用来提供相向泵浦光的散射光强度不足以克服其在两区域间环路中传播时的吸收, 以致于无法在两区域中构成简并四波混频, 也就不能产生共轭波前。实验测得 KNSBN·Ce 晶体的阈值光强为  $4.53 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$  (入射条件同图 6)。

实验中还观察到, 偏离最佳入射位置、最佳入射角度时, 高于阈值的同一强度的入射光, 其自泵浦位相共轭响应时间有增大的趋势。这是由于入射光在晶体内形成的散射光中较弱的部分用来充当了泵浦光, 而较弱的散射光与入射光耦合需要较长的时间才能获得足够的能量用以克服环路中的吸收并建立稳定的共轭输出。

**结 论** 晶轴与晶面呈适当的夹角有利于提高晶体的自泵浦位相共轭反射率, 反射率的高低还与入射角和入射位置有关。所使用的晶轴与晶面成  $18^\circ$  角的 KNSBN·Ce 正六面体晶体, 最佳入射角为  $\theta = 45^\circ$ , 最佳入射位置为  $x = 2.35 \text{ mm}$ , 此时共轭反射率高达 57.16%。自泵浦位相共轭的形成时间随入射光强的增大而缩短, 低于  $4.53 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$  的入射光不能形成自泵浦位相共轭波前。

在光学信息处理中用到自泵浦位相共轭器件时选用适当的切割方式、适当的入射角和入射位置, 将有利于能量的充分利用。自泵浦位相共轭镜间发生级联时, 要提高整个装置的时间性能, 必须增加光强, 而激光器输出能量有限, 此时怎样充分利用能量就显得重要了。

### 参 考 文 献

- [1] J. O. White, M. Cronin-Glomb, B. Fischer *et al.*, Coherent oscillation by self-induced gratings in the photorefractive crystal BaTiO<sub>3</sub>. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**(6) : 450~ 452
- [2] J. Feinberg, Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(7) : 486~ 488
- [3] K. R. MacDonald, J. Feinberg, Theory of a self-pumped phase conjugator with two coupled interaction regions. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(5) : 548~ 553
- [4] G. L. Wood, W. W. Clark III, M. J. Miller *et al.*, Broadband photorefractive properties and self-pumped phase conjugation in Ce-SBN·60. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **23**(12) : 2126~ 2135
- [5] G. Salamo, M. J. Miller, W. W. Clark III *et al.*, Strontium barium niobate as a self-pumped phase conjugator. *Opt. commun.*, 1986, **59**(5/6) : 417~ 422

