

掺铈(Ce)铌酸锶钡($Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6$)单晶中 双光束耦合、放大的研究

徐怀方 金元望 何雪梅 唐元汾 张雁行

(上海师范大学物理系) (中国科学院上海硅酸盐研究所)

提要: 报道从同一激光器出射的两束光在 Ce-SBN 单晶中相交耦合后一波被另一波放大的实验, 并进行了初步的理论分析。从耦合强度对光束在晶体中交角的关系算出 Ce-SBN 单晶中截流子浓度为 $4.5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ (室温下); 从光耦合时能量的流动方向确定载流子带电的符号为正。比较了不同偏振态、不同波长、不同掺杂量及不同光强比时的耦合情况。

Investigation of two laser beam coupling and amplification in Ce-doped SBN single crystals

Xu Huai-fang, Jin Yuan-wang

(Physics Department, Shanghai Teachers' University, Shanghai)

He Xuemei, Tang Yuanfen, Zhang Yanxing

(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: The experiment of a laser beam amplified by the other after both beams crossing a Ce-doped (0.1Wt%) strontium barium niobate ($Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6$ or SBN, $x=0.48$) crystal is reported and preliminary theoretical analysis is given. The density of mobile charges in Ce-SBN is calculated to be $4.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (at ambient temperature). The sign of mobile charges determined from the energy flow direction is positive. Couplings at different polarizations, different wavelengths and different doping amounts are compared.

迄今为止,在可见光范围中除了 $BaTiO_3$ 以外,铌酸锶钡(SBN)或掺铈的铌酸锶钡(Ce-SBN)或许是一种具有最大光致折射率及光耦合效率的晶体。用它制成具有超过1的位相共轭反射率的反光镜及单向环形振荡器的实验已有报道^[3]。但对于SBN晶体光耦合的性能并未完全认识。例如,为了计算

该晶体的位相共轭反射率必须知道它的光致折射率 n_1 , 以及如何找出SBN中Ba及Sr的最佳配比以使它具有最大的 n_1 。我们从双光束耦合实验求得 Ce-SBN 中光致载流子密度,从而算出 n_1 及推算该晶体在双光束耦合中的其它一些属性。

收稿日期: 1986年3月10日

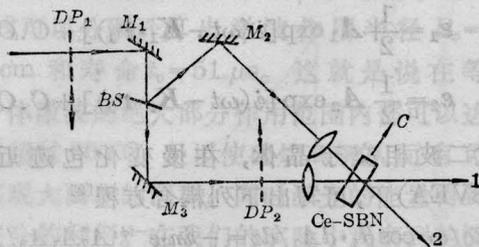


图1 晶体 Ce-SBN 中双光束耦合实验装置
 DP_1 、 DP_2 —可移动衰减板；BS—分束器

在如图1所示的实验安排中，一束线偏振连续激光(氙激光或氩-氦激光，在可见波段，毫瓦量级)经分束器分束后，以一定的夹角在单晶掺铈的铌酸锶钡(Ce-SBN)中再次相会(此单晶经过极化处理，并不在单晶上施加外电场， $22 \times 10 \times 1.78$ mm，110切割， c 轴平行于22 mm一边，通光方向厚约1.78 mm，钡含量 $x=0.48$ ，含 $CeO_2:0.1\%$ 重量)。当光束交叉通过晶体后，光束1将被放大，光束2将衰减(除了吸收以外)。当 c 轴反指时，光能耦合方向亦反转(即光束1减弱，光束2放大)。

一、光放大的实验结果

1. 时间特性

图2给出双光束耦合放大的时间特性。

在实验过程中，光束1始终照射着晶体。光束2在 t_1 、 t_2 ……等时刻被引进晶体，与光束1相交；并在 t'_1 、 t'_2 ……等时刻切断射向晶

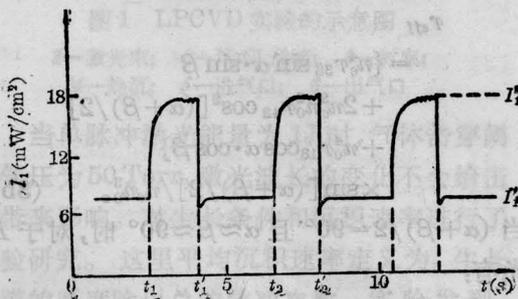


图2 晶体 Ce-SBN 中双光束耦合的时间特性
 光束2在时刻 t_1 、 t_2 ……被引进晶体，在时刻 t'_1 、 t'_2 ……被切断

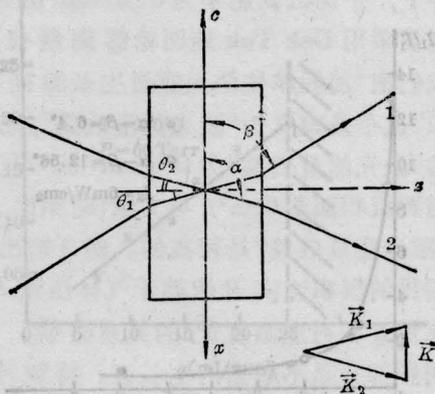


图3 晶体中二光束的坐标关系

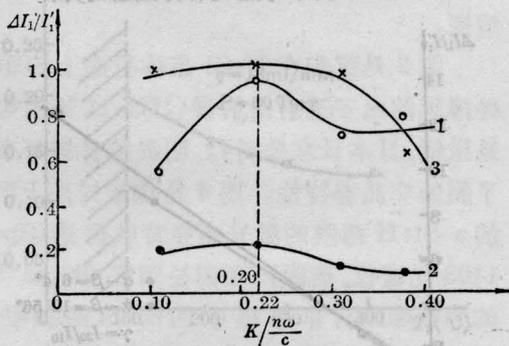


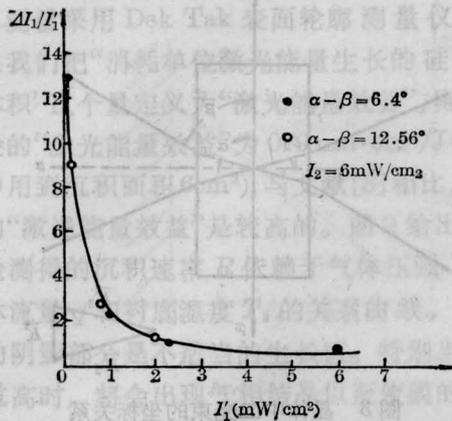
图4 耦合强度与 $|K|$ 的关系

1—e光, Ce: 0.1% Wt%, 晶体厚 0.17cm; 2—o光, Ce: 0.1Wt%, 晶体厚 0.17cm; 3—e光, Ce: 0.05 Wt%, 晶体厚 0.2cm

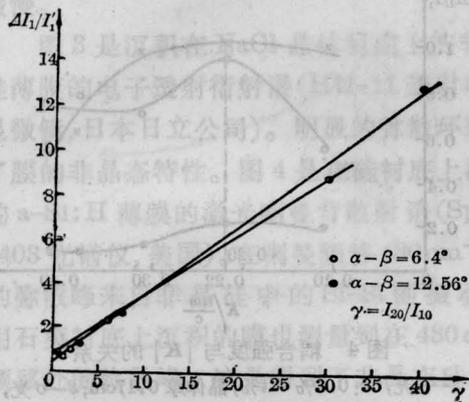
体的光路。光束1和光束2均未聚焦，它们的直径约为5 mm。此两光束的坐标关系如图3所示。从图2可以看出，光从相交到放大至 $0.7 I_{1max}$ 值约需0.5秒时间，此时间随 $(\alpha - \beta)$ (见图3)的不同而有所不同。

2. 耦合强度与光束交角的关系

令 I_{10} 和 I_{20} 分别代表光束1和光束2进入晶体前的光强， I'_1 代表不存在光束2时光束1通过晶体后的光强， I''_1 代表存在光束2且耦合达到稳定时光束1通过晶体后的光强。令 $\Delta I_1 = I''_1 - I'_1$ ， $\Delta I_1 / I'_1$ 称为耦合强度。在 $I_{10} \approx I_{20}$ 的情况下，耦合强度与光束交角(从而光栅矢量 $K = 2\pi/\Lambda$ ， $\Lambda = \lambda / [n \cdot 2 \sin(\frac{\alpha - \beta}{2})]$)之间的关系如图4所示。



(a) 耦合强度与 I_1 (当 I_2 保持恒定) 的关系



(b) 耦合强度与 γ 的关系

图 5

3. 耦合强度与光强比之间的关系

$I_{10} \neq I_{20}$ 时, 令 $\gamma = I_{20}/I_{10}$, 不同的 γ 将导致不同的耦合强度。其关系如图 5 所示。

二、分 析

在晶体 Ce-SBN 中双光束发生耦合的原因是两光束在晶体中相交时形成了折射率光栅, 而此光栅则是由于所谓“光致折射率效应 (Photorefractive effect)”形成的。

一旦在晶体中形成折射率光栅也就发生光耦合。这是可以通过解耦合方程得到解释的。

令光束 1、光束 2 的光电场方程分别为:

$$\mathbf{E}_1 = \frac{1}{2} \mathbf{A}_1 \exp[i(\omega t - \mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{r}_1)] + C.C.$$

$$\mathbf{E}_2 = \frac{1}{2} \mathbf{A}_2 \exp[i(\omega t - \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{r}_2)] + C.C.$$

此二波相交于晶体, 在慢变化包迹近似 (SVEA) 下, 可写出下列耦合方程^[2]

$$\left. \begin{aligned} 2c/\omega \cdot \cos \theta_1 \cdot dA_1/dz &= -in_1 e^{-i\phi_1} A_2^* A_1 A_2 / I_0 \\ 2c/\omega \cdot \cos \theta_2 \cdot dA_2/dz &= -in_1 e^{i\phi_1} A_2 A_1^* A_1 / I_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 ϕ_1 是折射率光栅相对于光电场干涉条纹移动的相位角, 现载流子带正电, 它就等于 $\pi/2$ 。其中的 n_I 由下式给出:

$$n_I = -r_{eff} n_0^3 E_p E_a / (E_p + E_a), \quad (2)$$

而 E_a 、 E_p 分别为

$$E_a = m K_B T K / e,$$

$$E_p = e P_a / e K_0.$$

式中: K_B 为玻耳兹曼常数, $K = |\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2| = 2\pi/\Lambda$, $\Lambda = \lambda/n \cdot 2 \sin(\frac{\alpha-\beta}{2})$, $m = 2\epsilon_1 \cdot \epsilon_2^*/I_0$ 为调制度, $I_0 = I_{10} + I_{20}$, P_a 为材料中载流子的密度, ϵ 为材料的相对介电常数。

ϵ 与电场方向有关。这里所述的载流子产生的静电场方向与 \mathbf{K} 平行, 即平行于 o 轴, 故 ϵ 应该用 ϵ_3 ; 对于 SBN 晶体, $\epsilon_3 = 511$ ^[3]。

在 SBN 晶体中, 有效电光系数 r_{eff} 有如下的关系^[3]:

对于 o 光,

$$r_{eff} = r_{13} \sin[(\alpha + \beta)/2]; \quad (3a)$$

对于 e 光,

$$\begin{aligned} r_{eff} &= \{n_0^4 r_{33} \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ &\quad + 2n_0^2 n_0^2 r_{42} \cos^2[(\alpha + \beta)/2] \\ &\quad + n_0^4 r_{13} \cos \alpha \cdot \cos \beta\} \\ &\quad \times \sin[(\alpha + \beta)/2] / n_0 n_0^3. \end{aligned} \quad (3b)$$

当 $(\alpha + \beta)/2 = 90^\circ$ 且 $\alpha \approx \beta \approx 90^\circ$ 时, 对于 E 光有:

$$r_{eff} \approx (n_e/n_o)^3 \cdot r_{33o} \quad (4)$$

把 (4) 式代入 (2) 式得:

$$n_I \approx -n_0^3 r_{33} E_p E_a / (E_p + E_a). \quad (5)$$

再令

$$E = E_p E_d / (E_p + E_d), \quad (6)$$

并把 E_p 和 E_d 值代入, 经过整理, 得到:

$$E = \frac{K_B T}{e} m \frac{K}{[1 + (K/K_0)^2]} \quad (7)$$

式中,

$$K_0 = (P_d e^2 / \epsilon \epsilon_0 K_B T)^{1/2}. \quad (8)$$

将(5)、(6)代入(1), 得到:

$$\left. \begin{aligned} 2c/\omega \cdot \cos \theta_1 \cdot dA_1/dz &= n_0^3 r_{33} E A_2^* A_1 A_2 / I_0, \\ 2c/\omega \cdot \cos \theta_2 \cdot dA_2/dz &= -n_0^3 r_{33} E A_2 A_1^* A_1 / I_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

若 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, 同时令 $B = n_0^3 r_{33} E \omega / c \cos \theta$, 则上式变为:

$$2dA_1/dz = B A_2^* A_1 A_2 / I_0, \quad (9.1)$$

$$2dA_2/dz = -B A_2 A_1^* A_1 / I_0. \quad (9.2)$$

将(9.1)式乘 A_1^* 后与(9.1)的共轭复式乘 A_1 后的式子相加: $(9.1) \times A_1^* + (9.1)^* \times A_1$, 即:

$$\begin{aligned} 2A_1^* \cdot dA_1/dz + 2A_1 \cdot dA_1^*/dz \\ = A_1^* B A_2^* A_1 A_2 / I_0 + A_1 B A_2 A_1^* A_1 / I_0, \end{aligned}$$

也即:

$$2d(A_1 A_1^*)/dz = 2B A_1 A_1^* A_2 A_2^* / I_0.$$

现令 $A_1 A_1^* = I_1$, $A_2 A_2^* = I_2$, 即得:

$$dI_1/dz = B I_1 I_2 / I_0. \quad (10.1)$$

类似地处理(9.2)式得:

$$dI_2/dz = -B I_1 I_2 / I_0. \quad (10.2)$$

从(10.1)式和(10.2)式可以看出, 随着 z 的增大, I_1 将增大 [(10.1)式右边大于零], I_2 将减小 [(10.2)式右边小于零]。这就解释了光耦合中的放大现象。同时也证明了我们在列方程(1)时所假定的 $\phi = \pi/2$ 是符合实际情况的。因此, 载流子符号对 SBN 晶体而言是正确的。

从(9)式我们可作进一步的分析。当 θ_1 和 θ_2 都很小时, 它们的余弦近似地等于 1。因此, 耦合主要由 $n_r (= -r_{eff} n_0^3 E)$ 决定; 当晶体给定后, 主要由 E 决定。而 E 的大小受到下列两个方面的制约:

其一是 E 必须满足泊松方程

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon \epsilon_0. \quad (11)$$

在载流子电荷场中, \mathbf{E} 仅与 x 有关(见图 3), 所以有:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial E}{\partial x} \cdot i \approx E / \frac{\Lambda}{2} = 2E/\Lambda.$$

式中 $\frac{\Lambda}{2}$ 是光感应的正负电荷层间的距离, 它等于光栅间隔 Λ 的一半^[1]。另外, $\rho = P_d \cdot e$ 。把这些关系代入(11)式得

$$2E/\Lambda = P_d \cdot e / \epsilon \epsilon_0,$$

或

$$E \cdot K = \pi P_d \cdot e / \epsilon \epsilon_0. \quad (12)$$

由于 P_d 是存在着上限的, 因而当 P_d 达到极大值后 E 将随 K 的增大(即光栅常数增大, 或光束交叉角增大)而减小。

对 E 的另一个制约是(7)式。若将(7)式对 K 求导数, 可以证明当 $K = K_0$ 时 E 为极大, 即耦合强度达到极大。所以, 从图 4 的 $K \sim \frac{\Delta I_1}{I_1}$ 的曲线峰值处找到对应的 K 就是 K_0 。从图 4 可见, $K_0 = 0.22 \frac{n\omega}{c} = 6.4 \times 10^4 / \text{cm}$, 代入(8)式(以 $n_0 = 2.2734$, $\lambda = 488 \text{ nm}$, $T = 283 \text{ K}$ 计)得:

$$P_d \approx 3.04 \times 10^{16} / \text{cm}^3.$$

这就是 Ce-SBN 单晶中当 CeO_2 含量是 0.1% 重量时的载流子浓度。从(7)式可求出 $E = 7.8 \times 10^4 \text{ V/m}$, 它就是光致折射晶体 Ce-SBN 中由光感应出的能产生电光效应的最大静电场值。另外, 从(5)式可求出 Ce-SBN 中最大的 n_r 为 1.19×10^{-4} 。

方程(10.1)和(10.2)的解为:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_0 \left/ \left[1 + \frac{1}{\gamma} \exp(-BZ) \right] \right.; \\ I_2 &= I_0 \left[1 + \gamma \exp(BZ) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中, $\gamma = I_{20}/I_{10}$ 。

当 $\lambda = 488 \times 10^{-9} \text{ m}$, $Z = 1.78 \times 10^{-3} \text{ m}$ (此为晶体厚度), $\theta \approx 90^\circ$ 时, (13)式中的 $BZ = 28$, $\exp(-BZ) = 6.9 \times 10^{-13} \approx 0$, $\exp(BZ) = 1.45 \times 10^{12}$ 。将这些结果代入(13)式, 得:

$$I_1 \approx I_0; I_2 \approx 0. \quad (14)$$

这个结果并不与实验相符。原因是方程(1)中没有计入晶体的吸收, 而 Ce-SBN 中光的

(8 图见) 关系... 表 1

| | $P_a(10^{16} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $E(\text{V/m})$ | n_I | n_e | n_o | ϵ_{\perp} | $\epsilon_{\parallel}^{**}$ | $r_{33}(10^{-12}\text{m/V})$ | $r_{42}(10^{-12}\text{m/V})$ |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------|----------------------------|-------|-------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| BaTiO ₃ | 1.3 | 1.2×10^5 | $\leq 7.58 \times 10^{-4}$ | 2.43 | 2.49 | 4300 | 106 | 28 | 820 |
| Ce-SBN | 3.04 | 7.8×10^4 | 1.19×10^{-4} | 2.27 | 2.31 | | 551 | 130 ^[3] | 6.3 ^[4] |

* BaTiO₃ 的 n_I 是根据文献[5], 当 $\alpha=168^\circ$, $\beta=160^\circ$, E 取最大值 $1.2 \times 10^5 \text{ V/m}^{[1]}$ 时算得(依据(3)式及(2)式)。

** Ce-SBN 中的 ϵ_{\parallel} (即 ϵ_3) 和 ϵ_{\perp} (即 ϵ_1, ϵ_2) 是相对于 Ba 含量 $x=0.48$ 而言; 且为低频值。 n_o, n_e 是对蓝绿光波段而言(BaTiO₃ 同样如此)。

吸收是很强烈的。如果以 $I = I_0 e^{-\alpha z}$ 来描写吸收的话, 则 $\alpha \approx 10/\text{cm}$, 且与光强有关。其次, 在晶体中光强与 Z 有关; 因此调制度 m 也不是一个常数(但偏离 1 不很大)。更符合实际情况的理论计算, 有待今后的工作。

忽略晶体吸收时, 解(14)式, 也可写成

$$\frac{\Delta I_1}{I_1} \approx \frac{I_1'' - I_{10}}{I_{10}}$$

即:
$$\frac{\Delta I_1}{I_1} \approx \frac{I_{20}}{I_{10}} = \gamma. \quad (15)$$

这结果, 反映了光束强度比 γ 愈大, $\frac{\Delta I_1}{I_1}$ 亦愈大, 这在一定程度上与实验相符(见图 5)。

表 1 列出 Ce-SBN 与 BaTiO₃ 的参数, 由上表可得到一个重要推论: Ce-SBN 晶体的光致折射率变量 n_1 与著名晶体 BaTiO₃ 中的相应值有同一数量级, 因此估计 Ce-SBN 将会有很多类似 BaTiO₃ 的特性出现, 而且 Ce-SBN 晶体有一个很大的优点就是它能接受几乎垂直于它表面(当该表面平行于 c 轴时)的光入射而获得大的耦合。Ce-SBN 的强吸收可通过降低 Ce 的含量来减小它; 当 CeO₂ 含量从 0.1% 降到 0.05% 重量时, 吸收系数由 10/cm 降到 6.9/cm(对 488 nm 而言), 而载流子浓厚没有降低。

三、不同条件下的光耦合

当 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 时, 类似的实验可求出 $K_0 \approx 2.3 \times 10^4/\text{cm}$, 从而可求出 $P_a = 0.58 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。可见, 这时晶体中被光所激发的载流子浓度大大减小。因此 632.8 nm 的光耦合, 比起 488 nm 的光耦合要弱得多。当使用 488 nm 的 o 光时, 从图 4 可见, 耦合也

大大减弱。这不仅是因为(3)式中所表示的对于 o 光是 r_{13} 在有效电光系数 r_{eff} 中起作用, 而 $r_{13} \approx \frac{1}{20} r_{33}$ (在 SBN 中) 相对说来小了很多; 而且 o 光电场方向与光栅矢量 K 垂直, 这也不利于电荷沿 K 方向移动和扩散。当 CeO₂ 的含量减少至 0.05% 重量时(但厚度为 2 mm), 由图 4 可见, 耦合非但不减弱, 而且还加强。当光束 1 和光束 2 不是对称配置而是让晶体从对称配置的位置转过一个小角度时, 往往能使耦合加强, 这可能是由于光束耦合的有效距离加大所致。

这里介绍的可见波段中毫瓦(甚至是微瓦)量级的连续波在 Ce-SBN 中的放大耦合实验, 很容易被用来作相干图象增强器、信息处理器(如相乘、卷积)、共轭放大反射器、环形单向振荡器等器件。

但是由于双光束耦合时的光束相对放大 $\Delta I_1/I_1$ 并不是一个常量而是与 γ 即 I_2/I_1 有关(几乎成线性关系, 见图 5(a)), 因而放大后的相干象中明暗的对比与放大前相比将发生严重失真。这个问题可能在 BaTiO₃ 中也同样存在^[6]。

参 考 文 献

- [1] Robert A. Fisher; "Optical Phase Conjugation" Academic Press, New York, 1983, pp. 422, 425.
- [2] A. Yariv; *Opt. Lett.*, 1981, **6**, No. 11, 519.
- [3] Baruch Fisher *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**, No. 10, 863.
- [4] P. V. L. Lenzo *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**, No. 1, 23.
- [5] Jeffrey O. White *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**, No. 6, 450.
- [6] F. Laeri *et al.*; *Opt. Commun.*, 1983, **47**, 387.