

# 高速调制光束的互泵浦相位共轭器的研究\*

过巴吉 汪家友 王立军 李晓春 石顺祥 王日昇

(西安电子科技大学, 西安 710071)

**提要** 利用光折变晶体中高速振幅调制光束的简并四波混频(DFWM)理论和互泵浦相位共轭器(MPPC)的两作用区模型,对高速振幅调制光束的MPPC进行研究,给出了MPPC的共轭反射率、透过率以及作用区中光扇开系数的表示式及数值结果。实验上所得到的互泵浦相位共轭光的规律与理论相吻合。

**关键词** 互泵浦相位共轭器, 高速调制光束

## 1 引言

最早的MPPC是双相位共轭镜(DPCM),是1984年由Cronin-Golomb等人<sup>[1]</sup>第一次在理论上进行研究,在1987年由Weiss等人<sup>[2]</sup>用实验得以验证。同年Smout<sup>[3]</sup>等人分析了互不相干光束在BaTiO<sub>3</sub>晶体中的耦合。1988年Ewbank<sup>[4]</sup>对所谓鸟翼式MPPC(BWMPPC)进行了研究,1989年他们又在SBN:Ce晶体中实现了所谓蛙腿式MPPC(FLMPPC),并用两个作用区的简并四波混频理论进行了理论分析<sup>[5]</sup>。1989年Wang等人用BaTiO<sub>3</sub>晶体实现了所谓桥式互泵浦相位共轭器<sup>[6]</sup>(Bridge MPPC)。目前,关于各种形式的MPPC的理论研究大都限于稳态情况。本文将利用文献[7]的光折变晶体中高速调制光束的DFWM理论,并结合MPPC的两个作用区模型,对输入光为高速振幅调制光时的BW MPPC进行理论和实验研究,给出了共轭反射率、透过率、作用区中的光扇开系数的表示式和数值计算结果。在实验上给出了相位共轭光的实验规律,与理论相吻合。表明利用互泵浦相位共轭可以实现高速调制信号的无失真传输,并且两路时域信号不会产生串扰,因而可望应用于光通讯,特别是时域编码通讯。

## 2 理论

图1是BWMPPC的示意图,图中G和G'是两个作用区,相应的作用区域为l<sub>1</sub>~l<sub>2</sub>和l<sub>1</sub>~l<sub>2</sub>。假定入射光束1和2是高速振幅调制的。光束3和5分别是作用区G和G'的扇开光,光束4和6分别是扇开光5和3经晶体内表面的反射光。这样,在作用区G和G'分别有光束1、3、4、1\*以及光束2、5、6和2\*的FWM过程。两个作用区处的边界条件有

$$\left. \begin{aligned} E_3(l_1) = 0, \quad E_5(l_1) = 0, \quad E_4(l_2) = re^{i\phi} E_5(l_2) \\ E_2^*(l_2) = 0, \quad E_1^*(l_2) = 0, \quad E_6(l_2) = r_e^{i\phi} E_3(l_2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金资助项目。

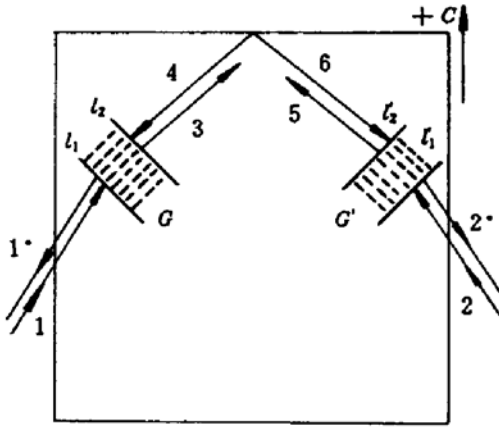


Fig. 1 BWMPPC with two interaction regions

式中  $r$  表示在晶体内表面处场的反射系数的模,  $\phi$  表示场在两个作用区之间传播和内表面反射时所引起的位相积累。

将参考文献[7]中关于光折变晶体中高速振幅调制光束的DFWM的结果分别应用于作用区  $G$  和  $G'$ , 并考虑到(1)式的边界条件, 又取  $l_1 = l_1 = 0, l_2 = l, l_2 = l$ , 再引入如下新的变量

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= e^{c_1}, & b_2 &= \exp\left(\frac{\Gamma_1 l}{I_0} + c_1\right), & d_1 &= b_1^2 \\ d_2 &= b_2^2, & d_3 &= b_1 b_2, & c &= [(1 + d_1)(1 + d_2)]^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} b'_1 &= e^{c'_1}, & b'_2 &= \exp\left(\frac{\Gamma'_1 l}{I'_0} + c'_1\right), & d'_1 &= b'^2_1 \\ d'_2 &= b'^2_2, & d'_3 &= b'_1 b'_2, & c' &= [(1 + d'_1)(1 + d'_2)]^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $\Gamma_1 l$  和  $\Gamma'_1 l$  分别为两个作用区的耦合强度,  $c_0$  和  $c_1$  是作用区  $G$  耦合方程组的两个积分常数,  $c'_0$  和  $c'_1$  是作用区  $G'$  耦合方程组的两个积分常数。

$$I_0 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{4r} + \bar{I}_{30} + \bar{I}_{1 \cdot r} \quad (4a)$$

$$c_0 = [4 \overline{m(0)}^2 + \overline{I(0)}^2]^{1/2} \quad (4b)$$

$$c_1 = \text{th}^{-1}\left(\frac{\overline{I(0)}}{c_0}\right) \quad (4c)$$

$$\overline{I(0)} = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{1 \cdot 0} - \bar{I}_{30} - \bar{I}_{40} \quad (4d)$$

$$\overline{m(0)} = \overline{E_{30} E_{10}^*} + \overline{E_{10}^* E_{1 \cdot 0}} \quad (4e)$$

$$I'_0 = \bar{I}_{20} + \bar{I}_{6r} + \bar{I}_{50} + \bar{I}_{2 \cdot r} \quad (5a)$$

$$c'_0 = [4 \overline{m'(0)}^2 + \overline{I'(0)}^2]^{1/2} \quad (5b)$$

$$c'_1 = \text{th}^{-1}\left(\frac{\overline{I'(0)}}{c'_0}\right) \quad (5c)$$

$$I'(0) = \bar{I}_{20} + \bar{I}_{2 \cdot 0} - \bar{I}_{50} - \bar{I}_{60} \quad (5d)$$

$$\overline{m'(0)} = \overline{E_{50} E_{20}^*} + \overline{E_{20}^* E_{2 \cdot 0}} \quad (5e)$$

经过一些运算后, 可得如下的关系

$$E_3(l, t) = c(b_2 - b_1)E_1(0, t) \quad (6a)$$

$$E_4(0, t) = c(1 + d_3)re^{i\phi}E_5(l, t) \quad (6b)$$

$$E_1(l, t) = c(1 + d_3)E_1(0, t) \quad (6c)$$

$$E_{1 \cdot}(0, t) = c(b_2 - b_1)re^{i\phi}E_5(l, t) \quad (6d)$$

$$E_5(l, t) = c'(b'_2 - b'_1)E_2(0, t) \quad (6e)$$

$$E_6(0, t) = c'(1 + d'_3)re^{i\phi}E_3(l, t) \quad (6f)$$

$$E_2(l, t) = c'(1 + d'_3)E_2(0, t) \quad (6g)$$

$$E_{2 \cdot}(0, t) = c'(b'_2 - b'_1)re^{i\phi}E_3(l, t) \quad (6h)$$

将(6)式代入(4)、(5)两式中就得

$$\overline{I(0)} = P_1 + r^2 c^2 c'^2 (b_1 - b_2)^2 (b'_1 - b'_2)^2 P_2 - c^2 c'^2 (b'_1 - b'_2)^2 (1 + d_3)^2 r^2 P_2 \quad (7a)$$

$$\overline{m(0)} = c^2 c'^2 (1 + d_3) (b'_1 - b'_2)^2 (b_2 - b_1) r^2 P_2 \quad (7b)$$

$$I_0 = P_1 + r^2 c'^2 (b'_1 - b'_2)^2 P_2 \quad (7c)$$

$$\overline{I'(0)} = P_2 + r^2 c^2 c'^2 (b'_1 - b'_2)^2 (b_1 - b_2)^2 P_1 - c^2 c'^2 (b_1 - b_2)^2 (1 + d_3)^2 r^2 P_1 \quad (8a)$$

$$\overline{m'(0)} = c^2 c'^2 (1 + d_3) (b_1 - b_2)^2 (b'_2 - b'_1) r^2 P_1 \quad (8b)$$

$$I'_0 = P_2 + r^2 c^2 (b_1 - b_2)^2 P_1 \quad (8c)$$

式中  $P_1 = \bar{I}_{10}$  和  $P_2 = \bar{I}_{20}$  分别为入射光束 1 和 2 的时间平均光强度。

现在令向量

$$X = (c_0, c_1, I_0, c'_0, c'_1, I'_0) \quad (9)$$

$$Y = (b_1, b_2, d_1, d_2, d_3, c, b'_1, b'_2, d'_1, d'_2, d'_3, c') \quad (10)$$

则由(4)、(5)、(7)、(8)各式可见,向量  $X$  可看作是以  $P_1$ 、 $P_2$  和  $r^2$  为参数的向量  $Y$  的函数,而由(2)、(3)式可见,向量  $Y$  实际上又是以两个作用区的耦合强度  $\Gamma_1 l$  和  $\Gamma'_1 l$  为参数的向量  $X$  的函数。这样便可得到如下形式的方程组

$$\tilde{X} = F(\tilde{X}) \quad (11)$$

式中  $\tilde{X}$  表示  $X$  的转置矩阵,这是一个典型的非线性方程组,在已知  $\Gamma_1 l$ 、 $\Gamma'_1 l$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  及  $r^2$  时,可利用牛顿—拉斐森(Newton-Raphson)迭代法进行数值求解,求得向量  $\tilde{X}$ ,再由(2)、(3)式求得  $Y$ ,求得  $Y$  后,就能对 MPPC 进行分析。

由(6d)、(6e)和(6a)、(6b)各式分别得到入射光束 1 和 2 的相位共轭光  $1^*$  和  $2^*$  的表示式为

$$E_{1^*}(0, t) = c(b_1 - b_2) r e^{i\phi} c' (b'_1 - b'_2) E_2(0, t) \quad (12)$$

$$E_{2^*}(0, t) = c' (b'_1 - b'_2) r e^{i\phi} c (b_1 - b_2) E_1(0, t) \quad (13)$$

可见,入射光束 2 的相位共轭光  $2^*$  携带有入射光束 1 的时域信息,入射光束 1 的相位共轭光  $1^*$  携带有入射光束 2 的时域信息。

现定义入射光强比为

$$q = I_{20}/I_{10} = |E_2(0, t)|^2 / |E_1(0, t)|^2 \quad (14)$$

又定义两个作用区  $G$  和  $G'$  的光扇开系数分别为

$$\text{fan1} = I_{3l}/I_{10} = |E_3(l, t)|^2 / |E_1(0, t)|^2 \quad (15a)$$

$$\text{fan2} = I_{5l}/I_{20} = |E_5(l, t)|^2 / |E_2(0, t)|^2 \quad (15b)$$

则(12)和(13)式分别给出入射光束 1 和 2 的相位共轭反射率  $R_1$  和  $R_2$  为

$$R_1 = |E_{1^*}(0, t)|^2 / |E_1(0, t)|^2 = c^2 c'^2 (b_1 - b_2)^2 (b'_1 - b'_2)^2 r^2 q \quad (16a)$$

$$R_2 = |E_{2^*}(0, t)|^2 / |E_2(0, t)|^2 = c^2 c'^2 (b_1 - b_2)^2 (b'_1 - b'_2)^2 r^2 \frac{1}{q} \quad (16b)$$

并有

$$R_1/R_2 = q^2 \quad (17)$$

由(6a)和(6e)式分别给出两作用的光扇开系数为

$$\text{fan1} = c^2 (b_1 - b_2)^2 \quad (18a)$$

$$\text{fan2} = c'^2 (b'_1 - b'_2)^2 \quad (18b)$$

再令  $t_1$  和  $t_2$  分别为光束 1 和 2 通过 MPPC 的透过率,有

$$T_1 = I_{2^*}(0, t)/I_1(0, t) = c^2 c'^2 (b_1 - b_2)^2 (b'_1 - b'_2)^2 r^2 \quad (19a)$$

$$T_2 = I_{1^*}(0, t)/I_2(0, t) = c^2 c'^2 (b_1 - b_2)^2 (b'_1 - b'_2)^2 r^2 \quad (19b)$$

所以有  $T_1 = T_2 = T$

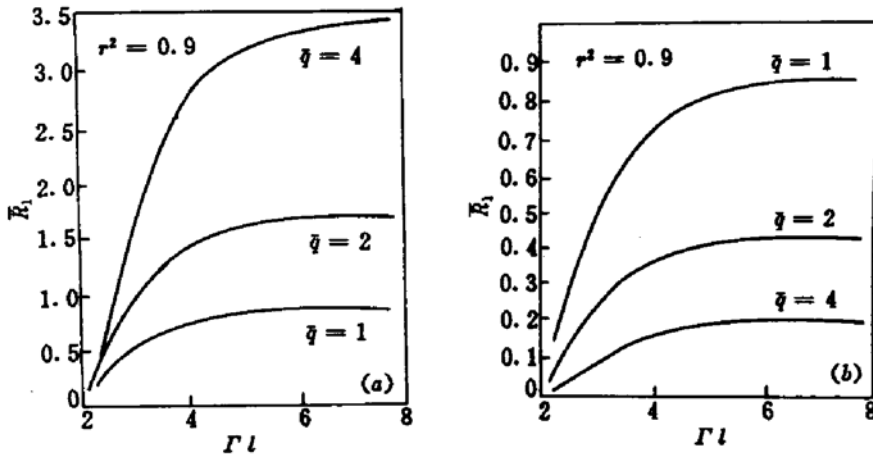


Fig. 2 The relation between  $R_1$  and  $R_2$  and the coupling strength  $\Gamma l$

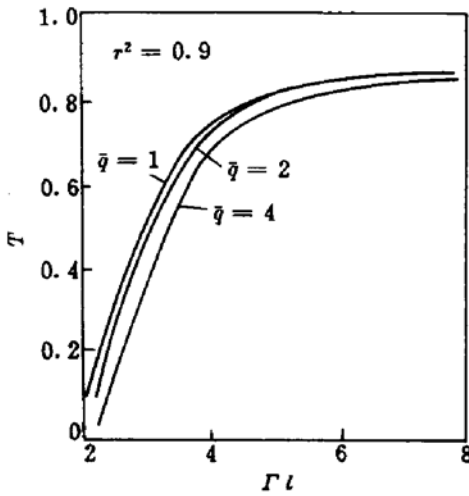


Fig. 3 The relation between  $T$  and the coupling strength  $\Gamma l$

由以上所给出的关系可见,扇开系数  $\text{fan1}$  和  $\text{fan2}$ 、透过率  $T$  都与时间无关。平均共轭反射率  $\bar{R}_1$  和  $\bar{R}_2$  有

$$\bar{R}_1 = c^2 c'^2 (b_1 - b_2)^2 (b'_1 - b'_2)^2 r^2 \bar{q} \quad (20a)$$

$$\bar{R}_2 = c^2 c'^2 (b_1 - b_2)^2 (b'_1 - b'_2)^2 r^2 / \bar{q} \quad (20b)$$

式中  $\bar{q}$  是平均入射光强比,即  $\bar{q} = \bar{I}_{20} / \bar{I}_{10}$ 。

图 2,图 3,图 4 是  $\bar{q}$  为参数,分别给出  $\bar{R}_1$ 、 $\bar{R}_2$ 、 $T$ 、 $\text{fan1}$  以及  $\text{fan2}$  随光束耦合强度变化的规律,在计算中我们取  $\Gamma l = \Gamma' l$ ,  $r^2 = 0.9$ ,  $P_1 = \bar{I}_{10} = 6.5$ 。

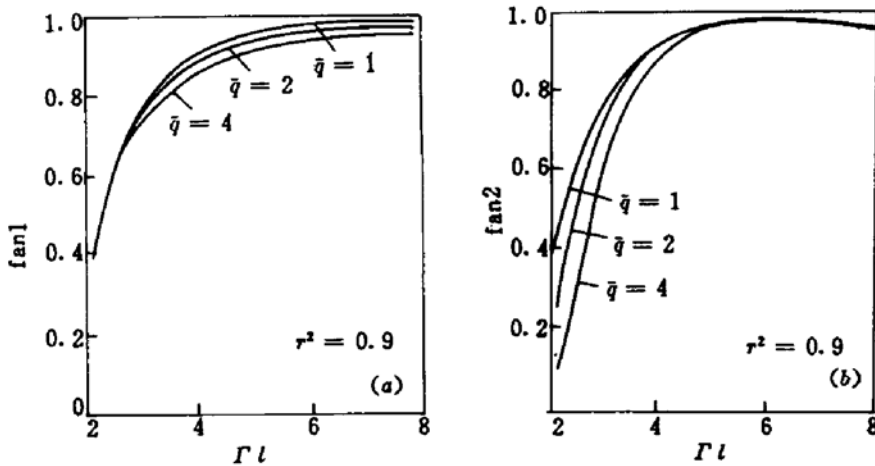


Fig. 4 The relation between  $\text{fan1}$  and  $\text{fan2}$  and coupling strength  $\Gamma l$

### 3 实验规律

图 5 是利用 CU:KNSBN 光折变晶体的高速振幅调制光束的互泵浦相位共轭的实验装置示意图。图中 1 是经声光调制器 AM 的零级强度调制激光束。激光束由  $\text{Ar}^+$  激光器(光谱物理公司产)发出,波长  $\lambda = 0.488 \mu\text{m}$ 。光电探测器  $PD_1$  和  $PD_2$  分别接收到的调制光束 1 和相位共轭

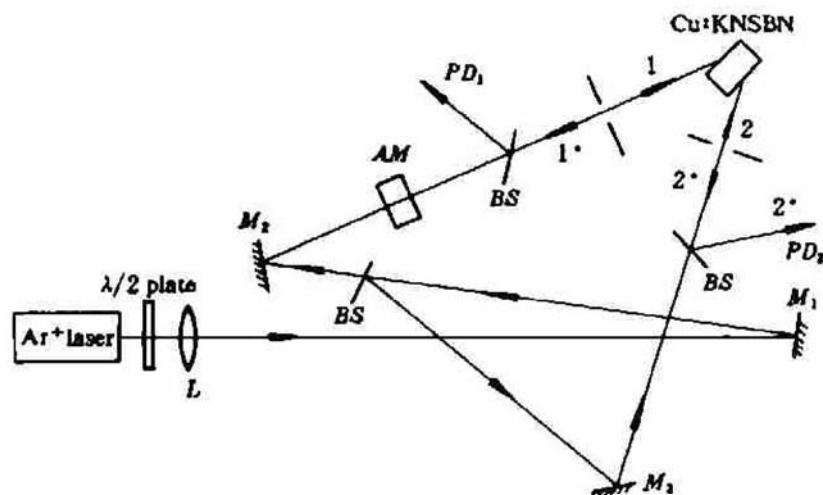


Fig. 5 Experimental scheme of MPPC with a speedily modulated beam

AM, acousto-optic modulator, BS, beam splitter, PD<sub>1</sub>, detector 1, PD<sub>2</sub>, detector 2; L, lens

光束 2' 的调制波形一并在 Tektronix 2465B 示波器上显示,如图 6 所示。照片中底部的是调制信号波形,上部是调制光束 1 的波形,中部是相位共轭光 2' 的波形。由图可见,2' 携带着 1 的时域信息,这与理论分析相吻合。实验中调制信号的频率为 1 kHz。

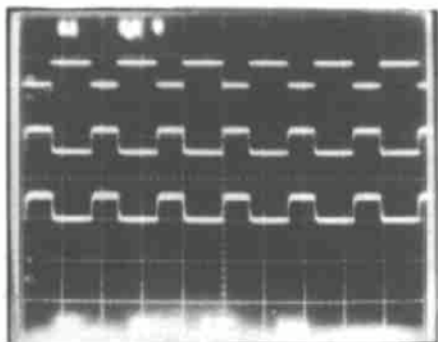


Fig. 6 The relation between beam 1 and 2' for MPPC with a speedily modulated beam

于其它双作用区形式的 MPPC。

## 4 结 论

从理论上和实验上都表明:可利用光折变晶体来实现高速振幅调制光束的双相位共轭。本文虽以 BWMPCC 为例进行分析和实验,但所得规律也适用于

## 参 考 文 献

- 1 M. D. Ewbank, R. A. Vazquez, R. R. Neurgaonkar *et al.*. Mutually pumped phase conjugation in photorefractive strontium barium niobate; theory and experiment. *J. Opt. Soc. Am. B.* 1990, 7(12): 2306~2316
- 2 M. Cronin-Golomb, B. Fischer, J. O. White *et al.*. Theory and applications of four-wave mixing in photorefractive media. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1984, QE-20(1):12~30
- 3 S. Weiss, S. Sternklar, B. Fischer *et al.*. Double phase-conjugate mirror; analysis, demonstration and application. *Opt. Lett.*, 1987, 12(7):114~116
- 4 A. M. C. Smout, R. W. Eason. Analysis of mutually incoherent beam coupling in BaTiO<sub>3</sub>. *Opt. Lett.*, 1987, 12(7):498
- 5 M. D. Ewbank. Mechanism for photorefractive phase conjugation using incoherent beams. *Opt. Lett.*, 1988, 13(1):47
- 6 D. Wang, Z. Zhang, Y. Zhu *et al.*. Observations on the coupling channel of two mutually incoherent beams without internal reflection in BaTiO<sub>3</sub>. *Opt. Commun.*, 1989, 73:495~500
- 7 关义春,石顺祥,安毓英等. 光折变晶体中高速调制光束的DFWM理论. 中国激光, 1989, 16(11):668~673

## Research of MPPC for Speedily Modulated Beams

Guo Siji Wang Jiayou Wang Lijun Li Xiaochun Shi Shunxing Wang Risheng

(Xidian University, Xian 710071)

**Abstract** Combining DFWM theory of speedily amplitude-modulated beams in photorefractive crystal with the model of two-interaction regions for the mutually pumped phase conjugator (MPPC), a theory of bird-wing MPPC (BWMPPC) for speedily amplitude-modulated beams is given. Some important parameters (Conjugate reflectivity, transmittivity and fanning-coefficient) are obtained by numerical methods. The experimental result shows that the characteristic of a MPPC coincides with that predicted by the theory.

**Key words** MPPC, speedily, modulated beams

广 告

力科光电有限公司向您致谢

力科公司自 1992 年创办以来,受到光学界的关怀而不断发展,为答谢广大客户,力科公司将以最好的品质和服务,为国内外用户效劳。

- 1 非线性晶体: KTP, DKDP, KDP, LI, LBO, BBO;
- 2 激光晶体: Nd: YAG, Cr: Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, Ti: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- 3 光学材料: CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub> 等。
- 4 二维光学调整架,晶体抛光,镀膜服务

力科光电有限公司  
济南七里河路 32 号

电 话: 0531-8931365  
传 真: 0531-8940794  
6960227

联系人: 祁建平

邮 码: 250100