

互泵浦相位共轭器的阈值耦合强度的分析*

过巴吉 李晓春 汪家友

(西安电子科技大学技术物理系, 710071)

摘 要 从理论上计算具有两个作用区的互泵浦相位共轭器的阈值耦合强度 $(\gamma L)_m$, 给出了 $(\gamma L)_m$ 与输入光强比 q 、光折变晶体内部通道强度传输系数 T_i 的规律。

关键词 互泵浦相位共轭, 阈值耦合强度, 四波混频。

1 引 言

1984年 Cronin-Golomb 等人^[1]在研究光折变四波混频的各种应用时, 最早从理论上阐述了双相位共轭镜(DPCM)的概念。1987年 Weiss 等人^[2]利用 BaTiO₃ 晶体第一次对双相位共轭镜共轭过程进行了实验研究。随后, 又有许多学者在其它晶体中, 以不同的作用方式, 实现了多种形式的互泵浦相位共轭器(MPPC)。如 Smout 和 Eason 的互不相干光束耦合器(MIBC), Ewbank 的鸟翼式相位共轭器(BWPC), Ewbank 和 Feinberg 的蛙腿式相位共轭器(FLPC)以及 Sharp 等人的桥式相位共轭器(BPCM)。Yeh 等人^[3]还总结了各类互泵浦相位共轭器的共同特性。而在有关理论和实验工作的报道中, 都没有涉及到对互泵浦相位共轭器的阈值耦合强度规律的研究, 但这是一个关系到互泵浦相位共轭器能否正常工作的问题, 对它的研究, 既有理论意义, 也有实际意义。本文将以光折变晶体的互泵浦相位共轭器的双作用区理论模型为基础, 从理论上具体地讨论互泵浦相位共轭器的阈值耦合强度的有关规律。

2 双相位共轭镜的分类

各类互泵浦相位共轭器在晶体内的作用光路如图 1 所示。在所有的形式中, 两束互不相干的入射光, 通过光折变晶体的光扇效应, 产生各自对方的相位共轭光。共轭光的产生既不需要外加腔镜, 也不需要其它的泵浦源。根据图 1 所示的光路, 从理论上, 可以将它们分为单作用区[图 1(a)]和双作用区[图 1(b)~图 1(e)]两类模型来分析。实际上, 对上述各种形式, 晶体内部的实际光路, 不同程度地呈现弯曲的形状。这就表明光束在晶体内的作用是一个连续的过程, 边传输, 边耦合。而人们把光束之间的耦合限制在一个或两个有限的作用区内, 视光束如图 1 所示的呈折线状传输, 这乃是为简化理论分析所作的一种近似。

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期:1994年3月29日; 收到修改稿日期:1994年6月13日

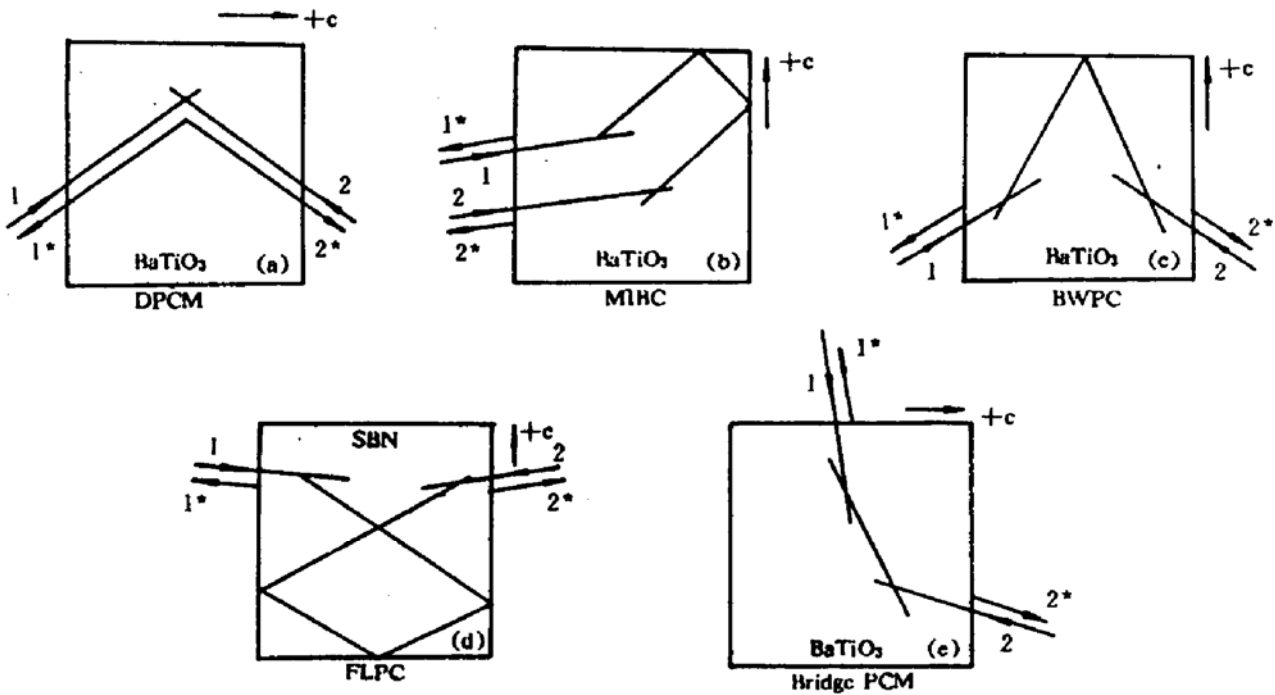


Fig. 1 Sketches of various mutually pumped phase conjugators

3 双作用区模型的互泵浦相位共轭器的阈值耦合强度计算

3.1 双作用区的互泵浦相位共轭器的分析模型

现在以蛙腿式的互泵浦相位共轭器为例，来讨论耦合强度的问题，其分析方法及结果均适用于具有两个作用区的其它类型的互泵浦相位共轭器。图 2 给出了蛙腿式双作用区模型示意图。其中左边的作用区 G 位于 $l_1 < z < l_2$ ，产生四波混频的四个作用光束分别为：4（左入射光），1（光 4 的扇开光，传向右作用区），2（来自右作用区的扇开光）和 3（光 4 的相位共轭光）。右作用区 G' 位于 $l'_1 \leq z' \leq l'_2$ ，相应的四个作用光束分别为：4'（右入射光），1'（光 4' 的扇开光，传向左作用区），2'（来自左作用区的扇开光）和 3'（光 4' 的相位共轭光）。

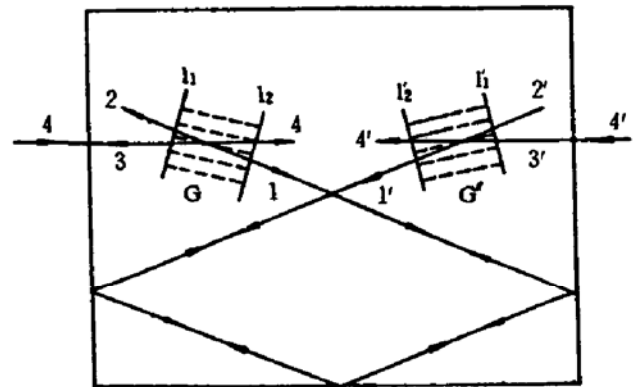


Fig. 2 Simplified diagram of the frog-legs phase conjugator (FLPC) with two interaction regions

根据 Cronin-Golomb 等人关于简并四波混频理论^[1]，对透射光栅的情况，在场振幅慢变化近似下，并假定两个作用区的振幅耦合强度相等，以及忽略作用区内场的衰减，可求得相位共轭镜的相位共轭反射率为^[4]：

$$R = |A_3(l_1)/A_4^*(l_1)|^2 = |C/d_1|^2, \quad R' = |A_3(l'_1)/A_4^*(l'_1)|^2 = |C/d'_1|^2. \quad (1)$$

两入射光 4 和 4' 沿相反方向通过两个作用区的透过率为：

$$T = |A_3(l_1)/A_4(l_1)|^2 = |A_3(l_1)/A_4(l_1)|^2 = qR = R'/q = |C|^2/d_1 d'_1. \quad (2)$$

式中 $d_1 = I_4(l_1)$ ，为左侧输入晶体内的光强度， $d'_1 = I_4(l'_1)$ 为右侧输入晶体内的光强度， $q = d_1/d'_1$ 为左右两侧输入光强之比。 $|C|^2$ 、 d_2 和 d'_2 是两个作用区波混频的耦合微分方程组的积分常数，其值可由下列三式

$$\tanh [\gamma L \sqrt{(d_2 - d_1)^2 + 4|C|^2}/2(d_1 + d_2)] = \sqrt{(d_2 - d_1)^2 + 4|C|^2}/(d_2 + d_1) \quad (3)$$

$$\tanh [\gamma L \sqrt{(d'_2 - d'_1)^2 + 4|C|^2}/2(d'_2 + d'_1)] = \sqrt{(d'_2 - d'_1)^2 + 4|C|^2}/(d'_2 + d'_1) \quad (4)$$

$$|C|^2 = d_2 d'_2 / T_i \quad (5)$$

联立求解。式中 γL 为作用区的振幅耦合强度。

3.2 方程组解的分析

对(3)~(5)式求解发现,在一般情况下,解不是唯一的。图3给出在 $q=1$ 时所得到的相位共轭反射率与耦合强度之间的关系曲线,方程组的解呈上下两支。Ewbank 在文献[4]中所给出的结果只对应于图3中的上支。由图3可见,解的下支比上支小得多,而且随着耦合强度的增大而迅速地减小。下支解的另一特征是该支解的相位共轭反射率 R 与 T_i 有如图4所示的关系,这表明 R 随 T_i 的减小而增大。

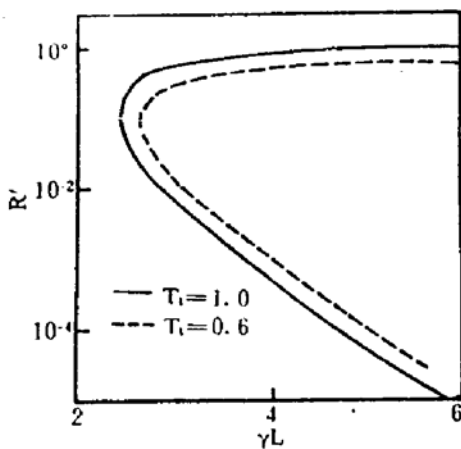


Fig. 3 The dependence of phase conjugate reflectivity on γL for DPCM with two interaction regions

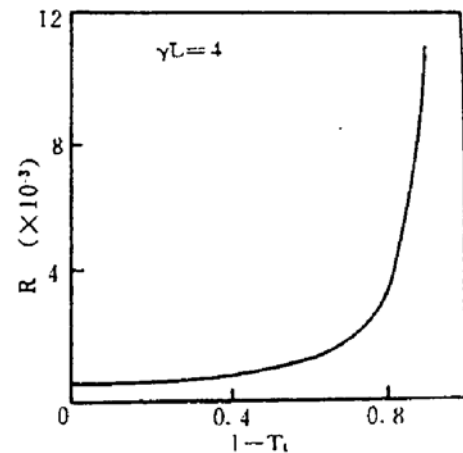


Fig. 4 The relation between R and T_i . Here R is corresponding to the lower branch of Fig. 3

根据图3和图4所示的特性,方程组的下支解从物理概念上讲是不合理的,所以在物理上是不可实现的,因此在计算阈值耦合强度时,将不予考虑方程组的下支解。

3.3 阈值耦合强度的计算

在实际计算中发现,为使方程组能给出一个有意义的实数解,要求晶体所提供的耦合强度 γL 必须大于某一特定的阈值。因此,对阈值耦合强度进行分析讨论,这对于合理地选择参数以确保互泵浦相位共轭器的正常工作是具有实际指导意义的。首先讨论 $q=1$ 的情况,然后讨论 $q \neq 1$ 的一般情况。

3.3.1 $q=1$ 的情况

当 $q=1$,即左右入射光强相等时,考虑到两作用区的完全对称性,应有 $d_2 = d'_2$,将此关系代入(3)式和(5)式,则(3)式的右端仅为 d_2 的函数,记为 $f(d_2)$

$$f(d_2) = \sqrt{(d_2 - d_1)^2 + 4d_2^2/T_i} / (d_2 + d_1). \quad (6)$$

这时(3)式变为

$$\tanh [\gamma L f(d_2)/2] = f(d_2). \quad (7)$$

由此可得

$$\gamma L = \frac{1}{f(d_2)} \ln \frac{1 + f(d_2)}{1 - f(d_2)}. \quad (8)$$

显然, 这是一个关于 $f(d_2)$ 的偶函数, 且当 $f(d_2) > 0$ 时是单调增加的。另外, 由(6)式可以证明, 当 $d_2 = [T_i / (T_i + 2)]d_1$ 时, $f(d_2)$ 具有最小值

$$f(d_2)_{\min} = 1 / \sqrt{1 + T_i} \quad (9)$$

因而将(10)式代入(8)式便求得阈值耦合强度 $(\gamma L)_{th}$ 为

$$(\gamma L)_{th} = \sqrt{1 + T_i} \ln [(\sqrt{1 + T_i} + 1) / (\sqrt{1 + T_i} - 1)] \quad (10)$$

从概念上讲, 在其它条件不变时, T_i 愈小, 阈值耦合强度愈大。图 5 给出了按(10)式求得的在 $q = 1$ 时互泵浦相位共轭器的阈值耦合强度与 T_i 之间的具体关系。这正是预科之中的结果。

3.3.2 $q \neq 1$ 的情况

对于 $q \neq 1$ 的情况, 阈值耦合强度的计算相对来说, 要复杂一些。其基本求解的方法是, 由(3)式和(4)式联立给出 d_1 与 d_2 之间的函数关系, 再利用(5)式可将(3)、(4)两式的右端化为 d_1 或 d_2 的一元函数。然后再求此函数的极值, 即可求得 $(\gamma L)_{th}$, 按上述思路并通过数值计算, 得到的结果示于图 6~图 8。

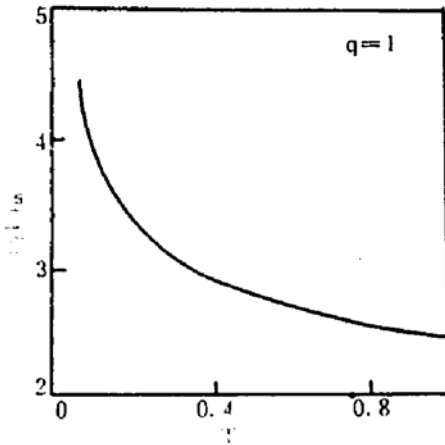


Fig. 5 The relation between $(\gamma L)_{th}$ and T_i for MPPC with two interaction regions ($q = 1$)

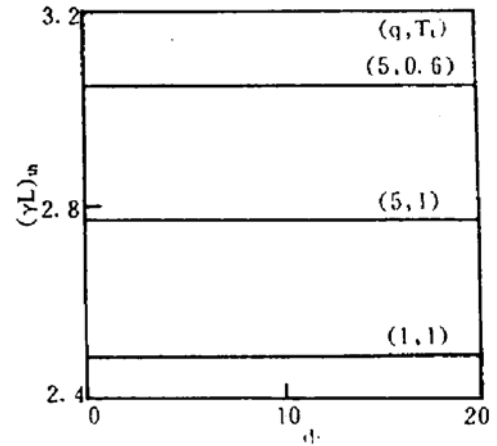


Fig. 6 The relation of $(\gamma L)_{th}$ vs d_1 for MPPC with two interaction regions

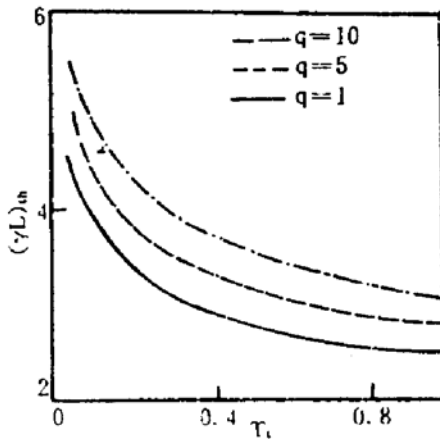


Fig. 7 The relation of $(\gamma L)_{th}$ vs T_i for MPPC with two interaction regions ($q \neq 1$)

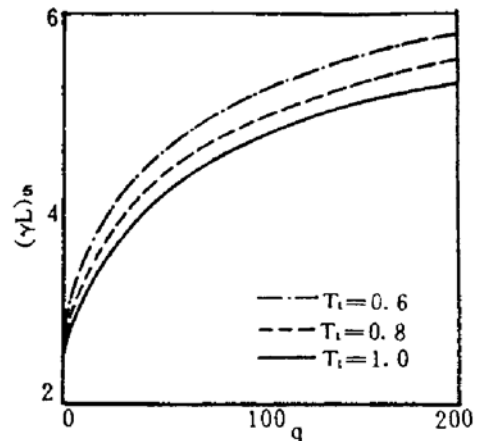


Fig. 8 The relation of $(\gamma L)_{th}$ vs q for MPPC with two interaction regions

图 6 表示双作用区模型的互泵浦相位共轭器的阈值耦合强度 $(\gamma L)_{th}$ 与入射光强度的大小无关, 仅决定于 q 和 T_i 。图 7 和图 8 表明光强比 q 偏离 1 愈远, T_i 愈小, 阈值耦合强度愈大。当 $q = 1, T_i = 1$ 时, $(\gamma L)_{th}$ 取最小值, 为 2.5 [这也可由(17)式算出]。这也就是说, 要在某晶体

中实现双作用区的互泵浦相位共轭, 当 $q = 1$ 和 $T_i = 1$ 时, 要求晶体能提供的非线性耦合强度的最小值应为 2.5, 否则就不可能实现。实际上, T_i 总是小于 1, q 也不一定等于 1, 因此要求阈值耦合强度 $(\gamma L)_th > 2.5$ 。

结 论 为了使具有双作用区的互泵浦相位共轭器正常工作, 晶体必须提供必要的耦合强度。理论计算表明, 阈值耦合强度 $(\gamma L)_th$ 的大小决定于输入光强比 q 和晶体内部耦合通道的光强传输系数 T_i , 前者由外界条件给出, 而后者由晶体的性质所确定。 T_i 愈小, q 偏离 1 愈远, 则阈值耦合强度 $(\gamma L)_th$ 愈大。当 $T_i = 1$ 和 $q = 1$ 时, $(\gamma L)_th$ 有最小值为 2.5。

参 考 文 献

- [1] Mark Cronin-Golomb, B. Fisher, J. O. White *et al.*, Theory and applications of four-wave mixing in photorefractive media. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, QE-20(1): 12~30
- [2] S. Weiss, S. Sternklar, B. Fisher, Double phase-conjugate mirror, analysis, demonstration and applications. *Opt. Lett.*, 1987, 12(2): 114~116
- [3] P. Yeh, T. Y. Chang, M. D. Ewbank, Model for mutually pumped phase conjugation. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, 5(8): 1743~1749
- [4] 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(2): 2306~2313

Analysis of the Threshold Coupling Strength for Mutually Pumped Phase Conjugator

Guo Siji Li Xiaochun Wang Jieyou

(Department of Applied Physics, Xidan University, Xian 710071)

(Received 29 March 1994; revised 13 June 1994)

Abstract In this paper the threshold coupling strength $(\gamma L)_th$ for mutually pumped phase conjugator with two interaction regions is calculated theoretically. The dependence of threshold coupling strength on the ratio of two incident light intensities and the transmission coefficient of light coupling channel between the two regions in crystal is presented.

Key words mutually pumped phase conjugation, threshold coupling strength, four-wave mixing.