

# 多作用区互抽运相位共轭效应输出特性的研究

蒋治国 刘继芳 马琳 石顺祥 孙艳玲

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 基于光折变自弯曲相继四波混频多作用区理论, 利用类电子学观点建立了多作用区互抽运相位共轭效应(MPPC)输出特性的理论计算模型。根据此模型数值模拟了作用区之间振幅传输系数对 MPPC 阈值耦合强度以及反射率的影响, 发现振幅传输系数越低, MPPC 所需要的阈值耦合强度越高, 且在相同的耦合强度下, 其输出反射率越低。实验研究了鸟翼式互抽运相位共轭器的输出特性, 获得了器件反射率随入射位置变化的曲线, 并建立了四作用区鸟翼式互抽运相位共轭器输出特性的理论模型, 数值模拟与实验结果基本一致。

**关键词** 非线性光学; 互抽运相位共轭效应; 类电子学; 四波混频

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1219001

## Study on Output Characteristics of Mutually Pumped Phase Conjugation with Multiple Coupled Interaction Regions

Jiang Zhiguo Liu Jifang Ma Lin Shi Shunxiang Sun Yanling

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** Based on the photorefractive self-bending successive four-wave mixing interaction theory, a computational model of mutually pumped phase conjugation (MPPC) with multiple coupled interaction regions is proposed to analyze the output characteristics under an electronics-like point of view on four-wave mixing. Using the model, the influence of threshold coupling strength and phase-conjugate reflectivity on transmissivity between the coupled interaction regions is investigated. The smaller transmissivity will decrease the phase-conjugate reflectivity under the same coupling constant and increase the threshold coupling constant. The output characteristics of bird wing MPPC are studied with experiment, and the dependence of phase-conjugate reflectivity of MPPC on the incident position is presented. An output characteristics model of bird wing MPPC with four coupled interaction regions is proposed, and simulation conclusions are in agreement with the experimental results.

**Key words** nonlinear optics; mutually pumped phase conjugation; electronics-like; four-wave mixing

**OCIS codes** 190.4380; 190.5040; 190.5330

## 1 引言

互抽运相位共轭器根据其作用形式有双相位互抽运相位共轭器、鸟翼式互抽运相位共轭器、蛙式互抽运相位共轭器和桥式互抽运相位共轭器等。许多研究者在进行互抽运相位共轭实验时, 都观察到连续的自弯曲光学通道。Zhang 等<sup>[1]</sup>对该现象提出了光折变自弯曲相继四波混频多作用区理论。对两作用区互抽运相位共轭器稳态输出特性的研究, 一般

需要求解两组边界条件耦合的四波混频方程<sup>[2]</sup>, 即 8 个微分方程, 计算难度大; 对多作用区互抽运相位共轭器而言, 其求解难度会更大, 给实际的工程应用造成不便。Belic 等<sup>[3]</sup>曾提出用类电子学方法来分析稳态下的光折变四波混频过程。本文基于此方法建立了多作用区互抽运相位共轭效应(MPPC)输出特性的理论计算模型, 数值模拟了作用区之间振幅传输系数对 MPPC 阈值耦合强度以及反射率的影

收稿日期: 2011-07-05; 收到修改稿日期: 2011-09-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(80027210)资助课题。

作者简介: 蒋治国(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光折变非线性光学方面的研究。E-mail: xidianzhiguo@163.com

导师简介: 刘继芳(1957—), 男, 博士, 教授, 主要从事非线性光学和光电技术应用等方面的研究。

E-mail: jfliu@xidian.edu.cn

响,并对鸟翼式互抽运相位共轭器反射率随入射位置的变化进行了实验研究,理论模拟与实验结果基本一致。

## 2 理论模型

四波混频是介质中四个光波相互作用所引起的非线性光学现象<sup>[4~6]</sup>,MPPC 的本质即四波混频产生相位共轭光。在稳态情况下,利用类电子学方法,把四波混频看成一系统,其输入输出写成<sup>[3]</sup>

$$\begin{pmatrix} A_{1L} \\ A_{4L} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(u) \begin{pmatrix} A_{10} \\ A_{40} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} A_{30} \\ A_{20} \end{pmatrix} = \mathbf{T}(u) \begin{pmatrix} A_{3L} \\ A_{2L} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中  $A_{1L} \sim A_{4L}, A_{10} \sim A_{40}$  分别为四波混频作用区 A 中的 1~4 号光在作用区长度  $z = L$  和  $z = 0$  处的振幅。 $\mathbf{T}(u)$  表征系统特性,即四波混频过程引起的光束振幅耦合作用,根据四波混频方程性质有

$$\mathbf{T}(u) = \begin{pmatrix} \cos u & \sin u \\ -\sin u & \cos u \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$u = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{\Gamma |Q|}{I} dz, \quad (3)$$

(3)式中  $L$  为四波混频作用区的有效宽度, $\Gamma$  为耦合强度, $Q = A_1 A_4^* + A_2^* A_3$  为四波混频形成的光栅振幅, $I$  为总光强。在稳态情况下,系统参数  $u$  可根据

以下四波混频方程性质确定<sup>[7]</sup>:

$$\cot u = \frac{aI \coth(a\Gamma/2) + I_{10} - I_{2L} + I_{3L} - I_{40}}{A_{10} A_{40}^* + A_{2L}^* A_{3L} + c}, \quad (4)$$

式中  $I_{10} = A_{10} A_{10}^*, I_{2L} = A_{2L} A_{2L}^*, I_{3L} = A_{3L} A_{3L}^*, I_{40} = A_{40} A_{40}^*$ 。

$$a^2 = \frac{4|Q|^2 + (I_1 + I_2 - I_3 - I_4)^2}{I^2}, \quad (5)$$

(5)式在作用区的 0 处和  $L$  处均成立。

在已知四波混频边界条件的情况下,通过(4),(5)式可得系统参数  $u$ ,即得到稳态情况下的四波混频输出特性。

现基于上面的方法来分析多作用区 MPPC 输入输出特性。图 1 给出了多作用区 MPPC 各输入输出光束之间的关系图,图中  $Z_{40}$  和  $ZZ_{40}$  为两入射抽运光, $Z_{10}$  和  $ZZ_{10}$  为两入射抽运光发生光扇效应分别形成的扇形散射光。作用区 A 和 AA 通过光学回路连接,作用区 A 中  $A_{1L}$  光经光学回路成为作用区 AA 中  $AA_{2L}$  光,由于光路可逆,作用区 AA 中  $AA_{1L}$  光经相同光学回路成为作用区 A 中  $A_{2L}$  光, $A_{1L}$  光与  $AA_{1L}$  光互为相位共轭光。其余作用区之间的关系为光折变自弯曲相继四波混频多作用区理论中各作用区之间的关系。 $Z_{30}$  光与  $ZZ_{30}$  光为最后输出的相位共轭光。

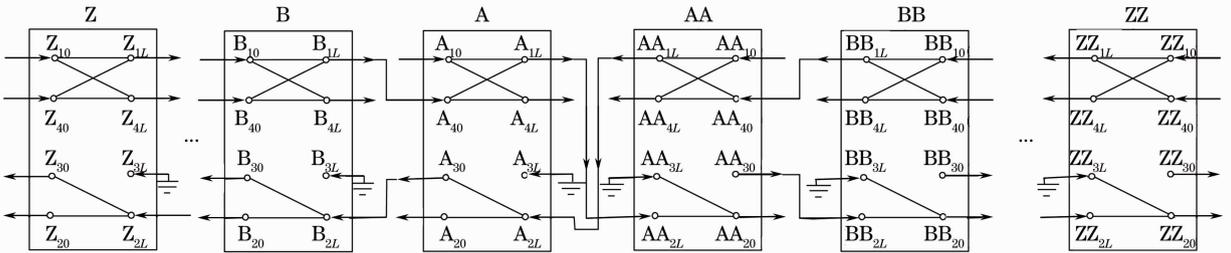


图 1 多作用区 MPPC 类电路图

Fig. 1 Circuit of MPPC with multiple coupled interaction regions

图 1 中,四波混频作用区 A 其耦合强度记为  $\Gamma_A$ ,其余作用区以此类推,作用区 B 和作用区 A 之间的振幅传输系数记为  $t_{B-A}$ ,其余作用区之间的传

输系数也以此类推。

利用各个光束之间的关系,多作用区 MPPC 强度反射率

$$R' = \left| \frac{I_{Z_{30}}}{I_{Z_{40}}} \right|^2 = q^2 t_{Z-Y}^2 t_{Y-X}^2 \cdots t_{B-A}^2 t_{A-AA}^2 t_{AA-BB}^2 \cdots t_{XX-YY}^2 t_{YY-ZZ}^2 \sin^2 u_Z \cdots \sin^2 u_A \sin^2 u_{AA} \cdots \sin^2 u_{ZZ}, \quad (6)$$

式中  $q$  为两入射抽运光振幅比,即  $q = A_{ZZ_{40}} / A_{Z_{40}}$ 。

对系统参数  $u_Z, u_Y, \dots, u_{ZZ}$ ,利用(4)式和(5)式,对作用区 A 有

$$a_A \coth\left(a_A \frac{\Gamma_A}{2}\right) = 1,$$

$$\cos u_A = \frac{1 + \frac{q^2 t_{A-AA}^2 t_{AA-BB}^2 \cdots t_{YY-ZZ}^2 \cdots \sin^2 u_{AA} \sin^2 u_{BB} \cdots \sin^2 u_{ZZ}}{t_{B-A}^2 \cdots t_{Z-Y}^2 \sin^2 u_Z \cdots \sin^2 u_B}}{2 \frac{q t_{A-AA} t_{AA-BB} \cdots t_{YY-ZZ} \sin u_{AA} \sin u_{BB} \cdots \sin u_{ZZ}}{t_{B-A} \cdots t_{Z-Y} \sin u_Z \cdots \sin u_B}} (1 - a_A^2)^{1/2}; \quad (7)$$

对作用区 AA,有

$$a_{AA} \coth\left(a_{AA} \frac{\Gamma_{AA}}{2}\right) = 1, \\ \cos u_{AA} = \frac{1 + \frac{t_{A-AA}^2 t_{B-A}^2 \cdots t_{Z-Y}^2 \sin^2 u_A \sin^2 u_B \cdots \sin^2 u_Z}{q^2 t_{AA-BB}^2 \cdots t_{YY-ZZ}^2 \cdots \sin^2 u_{ZZ} \cdots \sin^2 u_{BB}}}{2 \frac{t_{A-AA} t_{B-A} \cdots t_{Z-Y} \sin u_A \sin u_B \cdots \sin u_Z}{q t_{AA-BB} \cdots t_{YY-ZZ} \cdots \sin u_{ZZ} \cdots \sin u_{BB}}} (1 - a_{AA}^2)^{1/2}; \quad (8)$$

对作用区 N,有

$$a_N \coth\left(a_N \frac{\Gamma_N}{2}\right) = 1, \\ \cos u_N = \frac{1 + \frac{q^2 t_{N-M}^2 2t_{M-L}^2 \cdots t_{YY-ZZ}^2 \sin^2 u_M \sin^2 u_L \cdots \sin^2 u_{ZZ}}{t_{O-N}^2 t_{P-O}^2 \cdots t_{Z-Y}^2 \sin^2 u_O \sin^2 u_P \cdots \sin^2 u_Z}}{2 \frac{q t_{N-M} t_{M-L} \cdots t_{YY-ZZ} \sin^2 u_M \sin^2 u_L \cdots \sin^2 u_{ZZ}}{t_{O-N} t_{P-O} \cdots t_{Z-Y} \sin u_O \sin u_P \cdots \sin u_Z}} (1 - a_N^2)^{1/2}; \quad (9)$$

对作用区 NN,有

$$a_{NN} \coth\left(a_{NN} \frac{\Gamma_{NN}}{2}\right) = 1, \\ \cos u_{NN} = \frac{1 + \frac{t_{MM-NN}^2 t_{LL-MM}^2 \cdots t_{Z-Y}^2 \sin^2 u_{MM} \sin^2 u_{LL} \cdots \sin^2 u_Z}{q^2 t_{NN-OO}^2 t_{OO-PP}^2 \cdots t_{YY-ZZ}^2 \sin^2 u_O \sin^2 u_{PP} \cdots \sin^2 u_{ZZ}}}{2 \frac{t_{MM-NN} t_{LL-MM} \cdots t_{Z-Y} \sin u_{MM} \sin^2 u_{LL} \cdots \sin u_Z}{q t_{NN-OO} t_{OO-PP} \cdots t_{YY-ZZ} \sin u_{OO} \sin u_{PP} \cdots \sin u_{ZZ}}} (1 - a_{NN}^2)^{1/2}. \quad (10)$$

下面分两个作用区和多个作用区两种情况对上面模型的解法进行讨论。

## 2.1 两作用区 MPPC

对两作用区 MPPC,其作用区 A 有

$$a_A \coth\left(a_A \frac{\Gamma_A}{2}\right) = 1, \\ \cos u_A = \frac{1 + q^2 t_{A-AA}^2 \sin^2 u_{AA}}{2q t_{A-AA} \sin u_{AA}} (1 - a_A^2)^{1/2}; \quad (11)$$

对作用区 AA 有

$$a_{AA} \coth\left(a_{AA} \frac{\Gamma_{AA}}{2}\right) = 1, \\ \cos u_{AA} = \frac{q^2 + t_{A-AA}^2 \sin^2 u_A}{2q t_{A-AA} \sin u_A} (1 - a_{AA}^2)^{1/2}. \quad (12)$$

给定参数  $\Gamma_A, \Gamma_{AA}, t_{A-AA}$ , 通过求解(11)式和(12)式可得  $a_A, a_{AA}, u_A$  和  $u_{AA}$ , 即得两作用区 MPPC 各输入输出光束间的关系, 8 个微分方程转化为 4 个相对简单的方程, 给实际 MPPC 的工程应用提供了便利。

## 2.2 多作用区 MPPC

对多作用区 MPPC, 当两束抽运光对称入射时, 有

$$\Gamma_A = \Gamma_{AA}, \Gamma_B = \Gamma_{BB}, \cdots, \Gamma_Z = \Gamma_{ZZ}, \\ t_{B-A} = t_{AA-BB}, t_{C-B} = t_{BB-CC}, \cdots, t_{Z-Y} = t_{YY-ZZ}. \quad (13)$$

通过(13)式, (7)~(10)式中很多量可以约去, (7)式和(8)式简化为两作用区 MPPC 方程, 通过给定参数  $\Gamma_A, \Gamma_{AA}, t_{A-AA}$ , 可得  $\sin u_A, \sin u_{AA}$ 。

在已知  $\sin u_A, \sin u_{AA}$  的情况下, 利用(13)式简化(9)式和(10)式, 可求解出四波混频作用区 B 和 BB 的系统参数  $\sin u_B, \sin u_{BB}$ 。以此类推, 可求出其余作用区的系统参数, 即得多作用区 MPPC 的反射率。

## 3 作用区之间振幅传输系数

在多作用区 MPPC 的理论模型中, 作用区之间的振幅传输系数是一个很重要的参数。下面以两个作用区为例, 讨论振幅传输系数对 MPPC 阈值耦合强度以及反射率的影响。

图 2 为在对称入射, 抽运光振幅比  $q=1$  时, 在不同的振幅传输系数下, 两作用区 MPPC 反射率随耦合强度的变化曲线。根据图 2 所示特性, 方程组的下支解从物理概念上讲是不合理的, 在物理上不可实现, 因此将不考虑方程组的下支解。由图 2, 振幅传输系数越低, MPPC 需要的阈值耦合强度越高, 在相同的耦合强度下, MPPC 反射率越低。

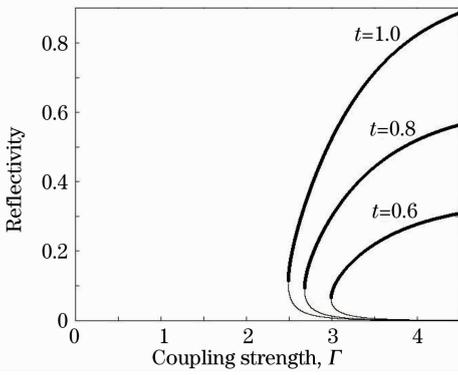


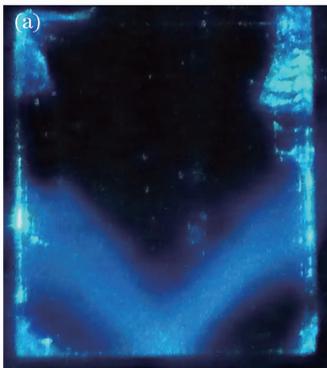
图 2 互抽运相位共轭反射率随耦合强度的变化曲线

Fig. 2 Phase-conjugate reflectivity versus coupling strength for various transmissivity of the optical path

在互抽运相位共轭器的各种作用形式中,鸟翼式互抽运相位共轭器需要 1 次界面反射,互不相干光束耦合器需要 2 次界面反射,而蛙式互抽运相位共轭器需要 3 次界面反射。一般情况下,界面反射次数越多,光路越长,损耗越大,作用区之间的振幅传输系数越低,形成互抽运所需要的阈值耦合强度越高,反射率也越低。

#### 4 实验装置

鸟翼式 MPPC 的实验装置如图 3 所示,激光源为 Ar<sup>+</sup> 激光器,波长 488 nm,光束经半波片,偏振方向相对于光折变晶体变 e 光入射<sup>[8]</sup>,经由分束器 BS<sub>1</sub>,分成两束光 2 和 2',光束 2 和 2' 分别经过分束器 BS<sub>2</sub> 和 BS<sub>3</sub>,反射光 3 和 3' 作为两束抽运光水平入射晶体。为了保证两光斑大小一致,还加了两光阑 IR<sub>2</sub> 和 IR<sub>3</sub>,光斑直径为 1 mm,两抽运光的光程差约为 20 cm,大于激光相干长度(约 5 cm)。通过仔细调整入射参数,出现相位共轭光 4 和 4'。每次



改变入射位置前,需要把前一次实验晶体中留下的光栅擦除。所用光折变晶体 PR 为 Cu:KNSBN,尺寸 6 mm×6 mm×7 mm,光轴沿 7 mm 方向,其具体参数为

$$\begin{aligned} N &= 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}, \\ r_{33} &= 200 \times 10^{-12} \text{ m/V}, \\ r_{51} &= r_{42} = 820 \times 10^{-12} \text{ m/V}, \\ \epsilon_{11} &= \epsilon_{22} = 588, \quad \epsilon_{33} = 500, \\ n_o &= 2.35, \quad n_e = 2.27. \end{aligned} \quad (14)$$

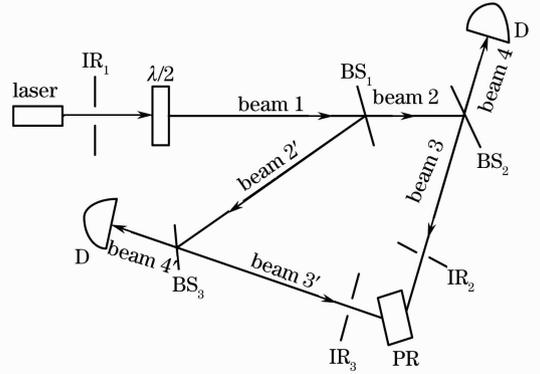


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of the experimental setup

#### 5 理论模拟与实验结果

图 4(a)为实验所得鸟翼式互抽运相位共轭器内部光学回路图,下面用四作用区 MPPC 模型对鸟翼式互抽运相位共轭器进行理论模拟,图 4(b)为晶体中光路的示意图<sup>[9~15]</sup>。

由图 4(b)可知鸟翼式互抽运相位共轭器输出反射率为

$$R = q^2 t_{B-A}^2 t_{A-AA}^2 t_{AA-BB}^2 \sin^2 u_B \sin^2 u_A \sin^2 u_{AA} \times \sin^2 u_{BB} T_p T'_p, \quad (15)$$

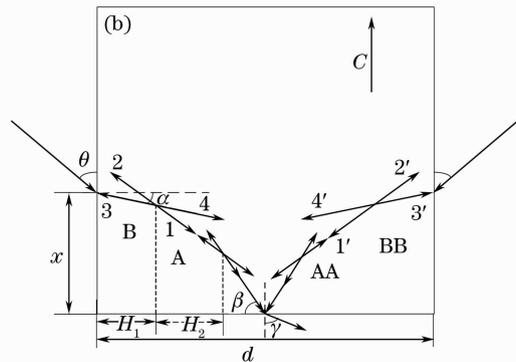


图 4 晶体内的光学回路

Fig. 4 Optical path in crystal

式中  $T_p$  和  $T'_p$  分别代表抽运光入射晶体和相位共轭光出射晶体时的强度透射率,其表达式为<sup>[8]</sup>

$$T_p = T'_p = \frac{\sin 2\theta \sin 2\alpha}{\sin^2(90^\circ - \theta + \alpha) \cos^2(90^\circ - \theta - \alpha)}. \quad (16)$$

由图 4 可得作用区 A 和 AA 之间振幅传输系数为

$$t_{A-AA} = \frac{\tan(90^\circ - \beta - \gamma)}{\tan(90^\circ - \beta + \gamma)}. \quad (17)$$

随着抽运光入射位置  $x$  的不同,在光折变晶体中对应的四波混频耦合强度不同,其耦合强度可写为

$$\Gamma = \frac{\omega}{2nc} \frac{r_{\text{eff}} E}{\cos\left(\frac{\beta - \alpha}{2}\right)} L, \quad (18)$$

(18)式  $E$  为空间电荷场

$$E = \frac{k_B T}{e} \frac{k_g}{1 + (k_g/k_0)^2} \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2^*,$$

$$k_0 = \left( \frac{Ne^2}{\epsilon \epsilon_0 k_B T} \right)^{1/2}, \quad (19)$$

式中  $\epsilon$  为介质中的相对介电常数

$$\epsilon = \epsilon_{\parallel} \sin^2[(180^\circ + \beta + \alpha)/2] + \epsilon_{\perp} \cos^2[(180^\circ + \beta + \alpha)/2], \quad (20)$$

$k_g$  为两入射光写入光栅的波矢值

$$k_g = 2(n\omega/c) \sin[(\beta - \alpha)/2], \quad (21)$$

$r_{\text{eff}}$  为有效电光系数,对异常光

$$r_{\text{eff}} = \left[ n_0^4 r_{13} \cos(90^\circ + \beta) \cos(90^\circ + \alpha) + 2n_e^2 n_0^2 r_{42} \cos^2\left(\frac{180^\circ + \alpha + \beta}{2}\right) + n_e^4 r_{33} \sin(90^\circ + \beta) \sin(90^\circ + \alpha) \right] \times \sin\left(\frac{180^\circ + \alpha + \beta}{2}\right), \quad (22)$$

$\mathbf{e}_1$  和  $\mathbf{e}_2$  分别为光束 1 和光束 4 在偏振方向的单位矢量,  $k_B T$  是热能,  $e$  是光生载流子电荷,  $N$  为光生载流子电荷密度,  $c$  为真空中的光速。

图 5 为两抽运光对称入射、入射角度  $\theta = 22.5^\circ$ 、入射抽运光振幅比  $q = 1$  的情况下,鸟翼式互抽运相位共轭器反射率与入射光位置到底面距离  $x$  之间的实验和理论模拟曲线。

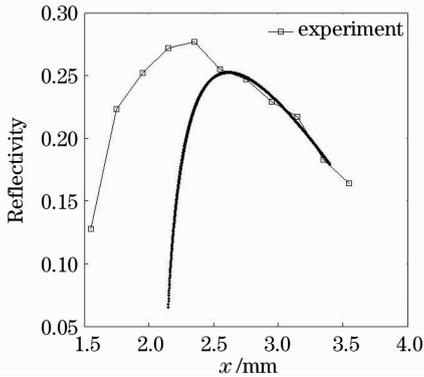


图 5 互抽运相位共轭器反射率随入射位置  $x$  的变化曲线

Fig. 5 Phase-conjugate reflectivity versus incident position  $x$

理论模拟中设作用区 A 和 AA 的有效宽度  $L_1 = 0.52$  mm, 作用区 B 和 BB 有效宽度  $L_2 = 0.9$  mm, 作用区之间振幅传输系数  $t_{B-A} = t_{AA-BB} = 0.9$ , 对作用区 B 和 BB 所选择的扇形散射光方向与

入射抽运光方向夹角为  $10^\circ$ , 作用区之间的距离  $H_1 = H_2 = 0.9$  mm。

如图所示,当  $x$  处于  $2.5 \sim 3.3$  mm 时,理论模拟和实验结果一致;在  $x < 2.5$  mm 时,出现误差,实测曲线前沿和峰值大于理论模拟。这是由于在不同的入射位置处,两入射抽运光会通过已有光折变光栅的不断擦除和写入,自适应地选择一条最佳光学通道形成互抽运相位共轭器,光路的弯曲程度、作用区之间的距离及作用区的数目等都会发生变化,此自适应选择的光学通道将使互抽运相位共轭器具有更高的反射率。此外,在固定作用区数目、距离情况下,某些理论上无法形成互抽运相位共轭器的位置(耦合强度  $\Gamma < 2$ )会通过改变光学通道满足阈值条件产生互抽运相位共轭器,因此实测曲线和理论模拟曲线只有部分吻合。

由图可见,理论模拟和实验结果趋势一致,存在一个最佳入射位置,在  $x$  比较小时,反射率为 0,这是由于 Cu:KNSBN 晶体为扩散型光折变晶体,其光生载流子为电子,扇形散射光往  $-C$  轴方向散射,一旦入射位置  $x$  过低,扇形散射光无法到达晶体底部中央与另一边形成光学回路,鸟翼式 MPPC 无法形成,故反射率为 0;当  $x$  比较大时,要求扇形散射光弯曲程度加大,光路的损耗也会增加,阈值耦合强度增加,反射率降低。

## 6 结 论

建立了多作用区 MPPC 输出特性的理论计算模型,研究了作用区之间振幅传输系数对 MPPC 阈值耦合强度以及反射率的影响,振幅传输系数越低, MPPC 所需要的阈值耦合强度越高,且在相同的耦合强度下,其输出反射率越低。对鸟翼式互抽运相位共轭器输出特性进行了实验研究,得到了器件反射率随入射位置变化曲线,模拟结论与实验结果基本一致。此多作用区 MPPC 的理论计算模型在 MPPC 的基础理论研究和工程应用方面都具有价值。

## 参 考 文 献

- Zhang Guangyin, Xu Jingjun, Wu Yuanqing *et al.*. Photorefractive self-bending and high-performance KNSBN:Cu crystal self-pumped phase-conjugator[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1992, **9**(1): 23~25
- Kenneth R. MacDonald, Jack Feinberg. Theory of a self-pumped phase conjugator with two coupled interaction regions [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(5): 548~553
- M. Belic, M. Petrovic, F. Kaiser. Photorefractive circuitry and optical transistors [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **123**(4-6): 657~664
- Dong Ze, Cao Zizheng, Lu Jia *et al.*. All-optical wavelength conversion based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier for OFDM optical signal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2952~2956  
董 泽, 曹子峥, 卢 嘉 等. 基于半导体光放大器的四波混频效应对正交频分复用光信号进行全光波长变换[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2952~2956
- Du Jianxin. Degenerate four-wave-mixing noise in dispersion managed wavelength-division-multiplexed system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2361~2367  
杜建新. 色散管理波分复用系统中的简并四波混频噪声[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2361~2367
- Li Peili, Shi Weihua, Huang Dexiu *et al.*. Theoretical investigation of nearly degenerate four-wave mixing in semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2864~2871  
李培丽, 施伟华, 黄德修 等. 半导体光放大器中入射光偏振不平行近简并四波混频效应的理论研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2864~2871
- M. Petrovic, M. Belic. Photorefractive ring oscillators[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(6): 1028~1035
- Shi Shunxiang, Zhang Haixing, Liu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000. 31  
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
- Wang Xiaoying, Shi Shunxiang. Investigation of the influence of the crystal geometry configuration on self-pumped phase conjugate properties[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1761~1765  
王晓颖, 石顺祥. 光折变晶体几何结构对自泵浦相位共轭特性影响的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1761~1765
- Xu Haiping, Shi Shunxiang, Zhao Wei *et al.*. Investigation into self-pumped and mutually pumped phase conjugation coexisting in Cu:KNSBN crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5): 588~591  
许海平, 石顺祥, 赵 卫 等. Cu:KNSBN 晶体自泵浦与互泵浦相位共轭共存特性的实验研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(5): 588~591
- Pochi Yeh, Tallis Y. Chang, M. D. Ewbank. Model for mutually pumped phase conjugation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(8): 1743~1749
- Wang Xiaoying, Shi Shunxiang. Investigation of influence of incident angle and crystal geometrical configuration on self-pumped phase conjugation properties[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1382~1386  
王晓颖, 石顺祥. 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[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1382~1386
- Wang Xin. Influence of light intensity change on two-central nonvolatile crossed-beam photorefractive gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 859~862  
王 欣. 光强变化对双中心非挥发光折变局域体光栅的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 859~862
- V. V. Eliseev, V. T. Tikhonchuk, A. A. Zozulya. Double phase-conjugate mirror: two-dimensional analysis [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(12): 2497~2504
- William R. Christian, Ragini Saxena, Ian Mc Michael. Seeding and grating phase in mutually pumped phase conjugators[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(1): 108~113

栏目编辑:李文誌