

信号 ν' 的增益有贡献, 从而减少了其对自身频率的信号的增益的贡献, 结果使增益烧孔深度 H_G 浅于粒子反转数烧孔深度 H_n , 另一方面又使 $\delta\nu_G$ 大于 $\delta\nu_n$ 。所以, (27) 式的结果是符合物理事实的。

5. 当 $I_s = I_0$ 时, 取不同的 k 值代入 (21) 式得:

$$G(\nu', I_s)|_{k=0} = G_i^0(\nu') / \sqrt{2}$$

$$G(\nu', I_s)|_{k=\pm 1/2} = G_i^0(\nu') \cdot (6\sqrt{2} + 21) / 41$$

$$G(\nu', I_s)|_{k=\pm 1} = 3G_i^0(\nu') / 4$$

因此, 我们可以描绘出 $G(\nu', I_s)$ 与 $G_i^0(\nu')$ 的关系曲线 (如图 2 所示)。显然, (21) 式表达了非均匀增宽增益曲线上的烧孔效应。

参 考 文 献

- 1 周炳琨等编。激光原理, 国防工业出版社出版, 1980年; 第2, 3章。
- 2 朱如曾等译。激光物理, 国防工业出版社出版, 1975年; 第八章
- 3 Joseph T. Verdeyen. Laser Electronics, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J. 07632, 1981; Ch. 8
- 4 Amnon Yariv. Quantum Electronics, John Wiley and Sons, Inc. 1975; Ch. 8

(收稿日期: 1987年3月24日)

双相位共轭镜组成的光腔中的高斯模

刘劲松

(西北电讯工程学院激光教研室)

Gaussian mode of a resonator formed by two phase-conjugate mirrors

Liu Jinsong

(Northwest Institute of Telecommunication Engineering, Xian)

Abstract: By introducing the transfer matrix of phase-conjugate mirror (PCM) which has explicit frequency variable, it has been derived that the Gaussian modes and stability condition in a phase-conjugate resonator (PCR) bounded by two PCM's which are formed via a nondegenerate four-wave mixing. The effect or frequency-flipping of PCM on the mode properties of the PCR has been discussed.

[1] 中用两个工作在近简并四波混频状态下的相位共轭反射镜 PCM 组成了一个相位共轭腔 PCR (本文记这种 PCR 为 NPCR), 并在其中实现了稳定振荡。本文通过引入 PCM 的显含频率的光束变换矩阵, 首次推出了 NPCR 中的高斯模及其稳定性条件, 得到的某些结论在一定近似程度上被 [1] 中的某些实验结果所证实。

一、显含频率的 PCM 变换矩阵

在推导 PCR 中的高斯模时, 首要的问题是需要定义一个合适的光束变换矩阵来描述 PCM 的运转。我们以 $q, \rho, W, \lambda, \omega$ 分别代表高斯光束的复曲

率、曲率、光斑尺寸、波长及频率。以下标 r 与 i 分别代表 PCM 入射光与反射光的光束参量。对 PCM 来说, 存在着如下基本关系^[2]:

$$q_r = -q_i^* \cdot \omega_r / \omega_i \quad (1)$$

式中

$$\frac{1}{q_r} = \frac{1}{\rho_r} - \frac{i\lambda_r}{\pi W_r^2}, \quad \frac{1}{q_i} = \frac{1}{\rho_i} - \frac{r\lambda_i}{\pi W_i^2} \quad (2)$$

设 ω_0 为 PCM 的泵浦光频率。一般情况下, $\omega_r \neq \omega_i$, 并可设 $\omega_r = \omega_0 + \delta$, $\omega_i = \omega_0 - \delta$ 。其中 $|\delta| \ll \omega_0$ 。一般称 PCM 的反射光与入射光频率不同这一现象为它的频率跳变特性。对简并情况, $\omega_r = \omega_i = \omega_0$, 频率跳变特性消失。

当 PCM 的泵浦光是平面波时, PCM 的光束变

换矩阵为^[3]

$$M_0 = \begin{pmatrix} a_0 & b_0 \\ c_0 & d_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_i} & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

(3) 式没有考虑到(1)式中的频率关系, 它不能反映 PCM 的频率跳变特性, 因此不能用它来推导 NPCR 中的高斯模。为此, 基于(1)式和(3)式, 我们引入显含频率的 PCM 变换矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_0 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_i} & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 $r_0 = \omega_r / \omega_i$, 可称之为频率跳变参量, 用它来描述频率跳变的大小。同(3)式一样, (4)式也仅对 PCM 的泵浦光是平面波时适用。若是高斯光束, 则应对矩阵元 C 加以修正。

二、PCM 入射面上的光束参数

图 1 给出了 NPCR 示意图。在下面的讨论中, 以下标 1 与 2 分别代表 PCM1 与 PCM2 入射面上光束的参量。设 PCM1 与 PCM2 的泵浦光的频率均为 ω_0 。若 $\omega_1 = \omega_0 + \delta$, 则由 PCM 的频率跳变特性可知, PCM1 反射光的频率为 $\omega'_1 = \omega_0 - \delta$ 。而 ω'_1 正好是 PCM2 入射光的频率 ω_2 。这样一来, PCM2 反射光的频率即为 $\omega_0 + \delta$, 这正好等于 ω_1 。这就是说, 当两个 PCM 的泵浦光的频率相等时, 虽然每个 PCM 都存在着频率跳变特性, 但光束在 NPCR 中往返一周后, 其频率依旧不变。PCM1 与 PCM2 的频率跳变参量可相应定义为

$$r_1 = \frac{\omega_0 - \delta}{\omega_0 + \delta} = r, \quad r_2 = \frac{\omega_0 + \delta}{\omega_0 - \delta} = \frac{1}{r} \quad (5)$$

设 M_1 与 M_2 分别为 PCM1 与 PCM2 的变换矩阵, 则

$$M_1 = \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} & 1 \end{pmatrix}, \quad M_2 = \begin{pmatrix} r_2 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_2} & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

考查图 1 中 PCM1 的入射面(即 S_1 面), 光束在 S_1 上的往返矩阵为

$$\begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d & b \\ c & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_2 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_2} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 a, b, c, d 为从 PCM1 到 PCM2 但不包括它们自身的变换矩阵元。同样可得 PCM2 入射面(即 S_2 面)上的往返矩阵为



图 1 由两个 PCM 组成的 NPCR

$$\begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} d & b \\ c & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_2 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_2} & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

由 ABCD 定律及高斯模的自洽条件不难推出

$$\frac{1}{\rho_j} = \frac{D_j - A_j}{2B_j}, \quad \left(\frac{\lambda_j}{\pi W_j^2} \right)^2 = \frac{(D_j - A_j)(A_j - D_j) - 4C_j B_j}{4B_j^2} \quad (9)$$

$j=1, 2$

由(7)~(9)式可推得

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{(r+1)c}{2d}, \quad \frac{\lambda_1}{\pi W_1^2} = \left[c \frac{2(bc+2)r - (r^2+1)bc}{4bd^2} \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{(r+1)c}{2ra}, \quad \frac{\lambda_2}{\pi W_2^2} = \left[c \frac{2(bc+2)r - (r^2+1)bc}{4br^2a^2} \right]^{1/2} \quad (11)$$

若 $r_1 = r_2 = 1$, 即 PCM1 与 PCM2 均工作在简并状态, 以上两式变为

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{c}{d}, \quad W_1^2 = \frac{\lambda_0}{\pi} \left(\frac{bd^2}{c} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{c}{a}, \quad W_2^2 = \frac{\lambda_0}{\pi} \left(\frac{ba^2}{c} \right)^{1/2} \quad (13)$$

式中 $\lambda_0 = \frac{2\pi v}{\omega_0}$ 。对于空腔, $c=0$, 从(10)~(13)式均可看出, 此时不存在稳定的高斯模。[1] 中在两个 PCM 之间放置了一个小孔光阑, 从一定程度上讲, 与消除这种不稳定性有关。从(10)~(13)式可以看出, 在腔中放置其他元件, 如一个合适的薄透镜, 也同样有助于消除这种不稳定性。

三、稳定性条件

光腔的稳定性条件就是腔内存在着真实高斯模的条件。这就是说, (10)~(13)式应给出一个实的、有限的 W_1 及 W_2 值。当 $r=1$ 时, 由(12)与(13)式知光腔的稳定性条件为 $\frac{c}{b} > 0$ 。当 $r \neq 1$ 时, 由(10)

或(11)式可推得稳定性条件为

$$\left. \begin{array}{l} \text{当 } bc > 0 \text{ 时, } r_\beta < r < r_\alpha \\ \text{当 } bc < 0 \text{ 时, } r_\beta > r > r_\alpha \end{array} \right\} \quad (14)$$

式中

$$\left. \begin{array}{l} r_\alpha = 1 + \frac{2}{bc}(1 + \sqrt{ad}) \\ r_\beta = 1 + \frac{2}{bc}(1 - \sqrt{ad}) \end{array} \right\} \quad (15)$$

实际中的 r 是一个非常接近于 1 的正数, 要想使光腔稳定, 就必须适当选择腔内光学元件的参数与位置以使得 a, b, c, d 能够满足(14)式。

以上的分析表明, NPCR 是条件稳定的。这一条件同腔内光学元件的参数、位置以及 PCM 的频率跳变参量有关。这一点不同于由一个工作在简并四波混频状态下的 PCM 与一个普通反射镜组成的 PCR。对后者来说, 它是无条件稳定的^[4]。

四、频率跳变对模式特性的影响

由于振动或热的作用, 频率跳变参量 r 会发生变化^[1], 这种变化必然会对 NPCR 的模式特性有影响。为了讨论这一影响, 可以研究 r 的变化对 W_1 或 W_2 的影响。由(10)式并注意 $\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{2}(1+r)$, 我们有

$$W_1 = \left[\frac{\lambda_0}{\pi} (r+1) \right]^{1/2} \left(\frac{bd^2}{c} \right)^{1/4} \times [2(bc+2)r - (r^2+1)bc]^{-1/4} \quad (16)$$

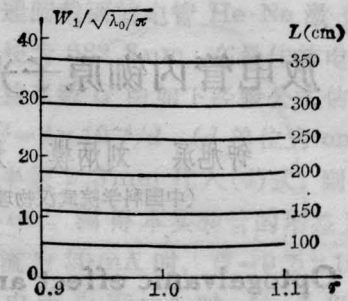
下面就腔内仅存在一个距 PCM1 为 u 的焦距为 f 的薄透镜的情况来进行讨论。此时(7)式中的 a, b, c, d 可具体表为

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L-u}{f} & L - \frac{u(L-u)}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{u}{f} \end{pmatrix} \quad (17)$$

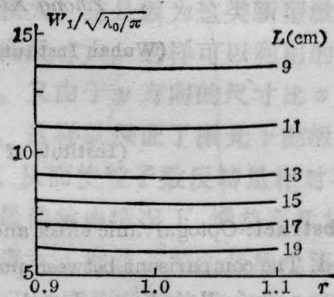
式中 L 为 NPCR 的腔长。

图 2 给出了利用(16)与(17)式求得的 $W_1/\sqrt{\lambda_0/\pi}$ 随 r 的变化曲线。从图 2 中可看出以下规律:

(1) 由于实际中 r 仅在 1 附近的一个非常小的范围



(a) $f=20$ cm, $u=L/2$



(b) $L=100$ cm, $u=50$ cm

图 2 W_1 随频率跳变参量 r 的变化规律

内变化, 而 W_1 在 $r=1$ 附近并不随 r 剧烈变化。因此, 频率跳变对 NPCR 模式特性的影响非常之小。(2) 在不同的腔体参数下, W_1 随 r 的变化率相差很小。因此, r 的变化对模式的扰动对于不同结构的 NPCR 来说差别甚微。

参 考 文 献

- 1 Mark Cronin-Golomb *et al.* *Opt. Lett.*, 1985; **10** (7): 353
- 2 Auyeung J *et al.* *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979; **QE-15** (10): 1180
- 3 Wang Shaomin *et al.* *Opt. Commun.*, 1982; **41** (5): 360
- 4 王绍民 *et al.* *光学学报*, 1983; **3** (1): 41

(收稿日期: 1987年5月26日)