

相位共轭镜和相位共轭腔*

吕百达 蔡邦维 周兴灵

(四川大学物理系, 成都)

摘要: 本文使用矩阵光学方法, 分析了下述论题: 1. 相位共轭镜的两类变换矩阵及其物理意义; 2. 相位共轭腔与常规稳定腔的比较; 3. 相位共轭腔的模参数; 4. 有频移的相位共轭腔; 5. 相位共轭腔的稳定性, 并提出了一些问题加以讨论。

Phase conjugate mirrors and phase conjugate resonators

Lu Baida, Cai Bangwei, Zhou Xinling

(Department of Physics, Sichuan University)

Abstract: Using matrix optics methods, the following subjects are analysed: 1. two forms of transfer matrix for PCM and their physical meaning, 2. comparison between PCR and conventional stable resonators, 3. beam parameters of PCR, 4. PCR having frequency shift, 5. stability of PCR. Some questions are proposed and discussed.

当常规光腔的一个反射镜或两个反射镜都用相位共轭反射镜(PCM)代替时, 就构成了相位共轭腔(PCR)。PCR具有能补偿腔内畸变、对失调不灵敏、稳定性好、输出光束质量高等优点, 并有明显的应用前景, 目前, 国内外在这一领域的理论和实验研究都十分活跃。本文拟使用矩阵光学方法, 对PCM和PCR有关的几个基本问题着重从物理上加以分析, 并提出一些看法供讨论。

一、相位共轭镜的变换矩阵的物理意义

由相位共轭的定义出发, Yariv等得出PCM的光线变换矩阵(第 I 矩阵形式)为^[1]

$$M_{PCM, I} = \begin{pmatrix} A_I & B_I \\ C_I & D_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

显然 $\det M_{PCM, I} = -1$ (2)

这时, ABCD定律应写为

$$q_r = (A_I q_i^* + B_I) / (C_I q_i^* + D_I) \quad (3)$$

式中, q_i 、 q_r 分别为在PCM上的入射波和反射波的高斯光束复参数, * 表示取复共轭运算。

利用(1)、(3)式可以研究简并四波混频(DFWM)、非简并四波混频(Non-DFWM)和双相位共轭腔(DPCR)的模式特性(在非简并情况, (1)式应作适当修正, 见后)。但

* 本文在第三届全国激光物理讨论会上报告。

(3)式与通常的 $ABCD$ 定律形式有异,有时会感到不便。为此,王绍民等引入了PCM的等效变换矩阵(第II矩阵形式)^[2]

$$M_{PCM, II} = \begin{pmatrix} A_{II} & B_{II} \\ C_{II} & D_{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/\rho & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\det M_{PCM, II} = 1 \quad (5)$$

使用(4)式时, $ABCD$ 定律可写为通常的形式

$$q_r = (A_{II} q_i + B_{II}) / (C_{II} q_i + D_{II}) \quad (6)$$

式中, ρ 为入射到PCM上的高斯光束等相面曲率半径。不妨对(1)~(6)式作以下讨论:

1. 直接由(1)、(3)式可看出PCM反演波前的性质,并可利用(1)式从矩阵光学观点解释PCM补偿波前畸变的特性。例如,设光波经一变换矩阵为 $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ 的扰动介质后发生畸变,经PCM反射和再次反向通过扰动介质后总的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

即虽然经PCM反射后的相位共轭波也含有扰动介质的变换矩阵元,但两次(正向和逆向)通过扰动介质和一次经PCM反射的总效果是补偿了畸变。一般的光学元件不具有这一特性,例如猫眼反射器

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(ad+bc) & -2bd \\ -2ac & -(ad+bc) \end{pmatrix} \quad (8)$$

同样,利用(4)、(6)式也能证明PCM的相位共轭特性

$$q_r = -q_i^* \quad (9)$$

并且,(4)式本身就已清楚表明PCM具有可变“曲率半径”的自适应特性。

2. $M_{PCM, I}$ 、 $M_{PCM, II}$ 从不同角度描述了PCM的变换特性,入射到PCM上的高斯光束曲率半径 ρ 既可取有限值,也可趋于无限大(束腰位于PCM处)。在处理PCR的模参数之类问题时,利用(1)、(3)或(4)、(6)式所得结果相同。但它们遵守的变换规律有不同的形式,因此对 $\rho \rightarrow \infty$ 情况,不能简单地企图在(4)式中令 $\rho \rightarrow \infty$ 而得出(1)式。然而,利用变换矩阵的等效变换公式^[2],很容易由(1)式出发推出它的等效变换矩阵形式(4)式。因此,我们认为(1)、(4)式是自洽的,在一定意义上是等效的。

3. 按照几何光学,由(1)式推知,球面波经PCM变换的象距始终等于物距,即具有1:1的成象特性。PCM的非高斯成象性质是与其它光学成象元件的一个显著区别。

二、常规稳定腔和相位共轭腔

对相距为 L 、曲率半径分别为 R_1 、 R_2 的两个普通球面反射镜组成的约束稳定光腔,利用 $ABCD$ 定律易证,入射在镜 i ($i=1,2$)上的高斯光束复参数 q_i 和经镜 i 反射后的高斯光束复参数 q_i ,反间有

$$q_{i,反} = -q_i, \lambda^* \quad (10)$$

即与(9)式形式上完全相同,是否由此推知常规腔有与PCR相类似的性质呢?

我们认为常规稳定腔并不具有PCR能产生相位共轭波和补偿腔内畸变的特性。从物理上分析,普通反射镜(又称真镜RM)的变换矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中，镜的曲率半径 R 为一确定值，不随入射光束参数而改变。但 PCM 却不然，(4) 式中的 ρ 是入射高斯光束等相面曲率半径，因此 PCM 的“曲率半径” R_{PCM} 不是常数，

$$R_{PCM} = \rho \quad (12)$$

正是这一原因，使 PCM 具有自适应特性，这是 PCM 与 RM 的根本差异。实验研究亦表明(例如文献[2]、[3])，对 PCR，若激光由 RM 一端输出，则能补偿腔内畸变，这是因为 PCM 能产生相位共轭波的缘故，并且就一次往返传输而言，光波顺次正向通过畸变介质、PCM、反向通过畸变介质，按(7)式畸变得以补偿。但常规光腔却并不具有这一性质，不仅畸变在输出光束中会反映出来，而且，当在腔内引入畸变物后，会在比 PCR 远高的阈值下停止振荡。

三、相位共轭腔的模式特性

利用(1)、(4)式及其修正形式，对 PCR 的模结构已进行了详细研究^[2,3,6]。并证明，当腔内仅存在实元件时，简并情况下 PCR 的横模是不确定的，引入振幅横向分布的虚元件，例如高斯光阑，则可使 PCR 的模确定下来。现对此作一具体分析，并提出一些问题讨论。

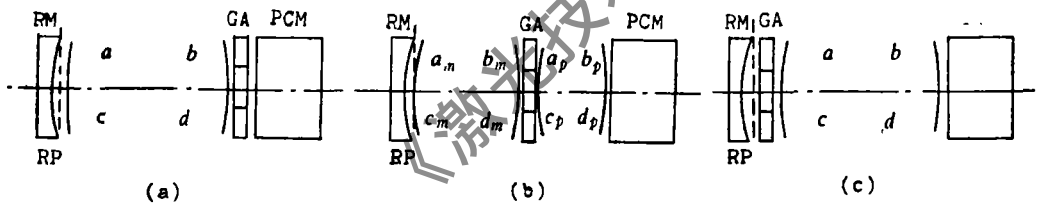


图1 带高斯光阑(GA)的相位共轭腔

a—GA 置于 PCM 处 b—GA 置于 PCR 中 c—GA 置于 RM 处

1. 高斯光阑置于 PCM 处

可以认为，由DFWM形成PCM本身具有一种横向振幅为高斯分布的限模结构，即PCM处置有一变换矩阵为

$$M_{GA} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -i\lambda/(\pi\sigma^2) & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

的高斯光阑，式中， σ 为高斯光阑的“宽度”^[2] (图1a)。设腔内单程变换矩阵为

$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ ，由(1)或(4)式和高斯光束往返一周自再现条件求得^[6]

(1) RM 处的光束参数 q_{RM} (w_{RM} , ρ_{RM})

$$w_{RM}^2 = (\lambda/\pi) \{ (1 + \xi) / (1/R^2 + \xi) \}^{1/2} \quad (14)$$

$$\rho_{RM} = 1 / \{ (-1/R) \pm \sqrt{[\xi^2 / (1 + \xi^2)] (1/R^2 + \xi)} \} \quad (15)$$

式中， $\xi = -2b\lambda G_1 / (\pi\sigma^2)$ (16)

$$\xi = a(2G_1 - a) / b^2 \quad (17)$$

$$G_1 = a - b/R \quad (18)$$

R 为真镜的曲率半径。在弱高斯光阑近似下 $\sigma \rightarrow \infty$,

$$w_{RM}^2 = (\lambda/\pi) |b/G_1| \quad (19)$$

$$\rho_{RM} = -R \quad (20)$$

(2) PCM处的光束参数 q_{PCM} (w_{PCM} , ρ_{PCM})

$$w_{PCM}^2 = \frac{2\lambda |bG_1|}{\pi \sqrt{1 + (2\lambda bG_1/\pi\sigma^2)^2}} \quad (21)$$

$$\rho_{PCM} = 2bG_1 / (2dG_1 - 1) \quad (22)$$

$$\sigma \rightarrow \infty \text{ 时, } w_{PCM}^2 = 2\lambda |bG_1| / \pi \quad (23)$$

2. 高斯光阑置于PCR中

文献[7]讨论了这一情况(图1b), 物理上, 这要求将专门制备的高斯光阑置于腔内。我们认为文献[7]中所使用的方法和所得某些结论的严格性是值得讨论的。例如, 文献[7]认为, 因位于高斯光阑之右的单程变换矩阵 $\begin{pmatrix} a_p & b_p \\ c_p & d_p \end{pmatrix}$ 诸元不出现在光束参数的公式中, 所以PCR能补偿位于PCM附近的畸变, 这一推理似不严格。又如对空腔

$$\begin{pmatrix} a_m & b_m \\ c_m & d_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_m \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{pmatrix} a_p & b_p \\ c_p & d_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_p \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$\text{和} \quad l_m + l_p = L \quad (L \text{ 为几何腔长}) \quad (26)$$

按文献[7]的方法会得出

$$w_{RM}^2 = \lambda l_m / \pi |G_1| \quad (27)$$

$$\text{和} \quad G_1 = 1 - l_m / R \quad (28)$$

而不是文献[7]中的(10)式。不仅如此, 我们分析一下高斯光阑位于RM处的极端情况会更清楚。

3. 高斯光阑置于RM处

见图1c, 类似于上面的方法, 在 $\sigma \rightarrow \infty$ 时得到

$$\rho_{RM} = -R \quad (29)$$

而 w_{RM} 可取任意值, 并且与腔内单程变换矩阵诸元无关。是否这就表示PCR能补偿腔内任意处的畸变呢? 这些都有待于进一步的实验鉴别。

四、有频移的相位共轭腔

目前, 对常规光腔模式结构的分析都限于无频移的情况, 特征参数的自再现条件也是在这一前提下成立的。对PCR, 有时会出现频率差异问题, 现分述如下:

1. Non-DFWM形成PCR

对Non-DFWM情况, 入射到PCM上的信号光频率与反射光频率不相同。由PCM的频率翻转(frequency flipping)特性, 设泵浦光频率为 ω , 信号光频率为 $\omega + \delta$, 则反射光频率为 $\omega - \delta$, PCM的变换矩阵为 $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ & 1 \end{pmatrix}$

$$M_{PCM, I} = \begin{pmatrix} 1 - \delta/\omega & 0 \\ 0 & -(1 + \delta/\omega) \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$M_{PCM, II} = \begin{pmatrix} (1 - \delta/\omega)/(1 + \delta/\omega) & 0 \\ -2/\rho & 1 \end{pmatrix} \quad (31)$$

由于PCM对频率为 $\omega \pm \delta$ 的入射光产生频率翻转后变成频率为 $\omega \mp \delta$ 的反射光，所以高斯光束在腔内往返一周后不可能实现自再现。因此，Non-DFWM形成的PCR不存在稳定的往返一周自再现高斯本征模。但两周往返后，频率经两次翻转复原，可由往返两周自再现条件求出其高斯本征模参数，其模结构示意图于图2。

2. 受激布里渊背散射 (SBBS) 形成PCR

因布里渊散射的频移量很小 (对固体介质约为 1cm^{-1} ，液体介质 0.1cm^{-1} ，气体介质 0.01cm^{-1})，为简单起见，在文献[8]的处理中忽略了频率的变化，而只考虑散射引起光斑尺寸 w_{PCM} 的改变。SBBS-PCM的等效变换矩阵为〔8〕

$$M_{PCM, II} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R - i\lambda(1 - \beta^2)/\pi(\beta^2 w^2) & 1 \end{pmatrix} \quad (32)$$

式中， $0 < \beta < 1$ 为一与入射光强和介质增益有关的正数， ρ 、 w 分别为入射高斯光束波面曲率半径和光斑尺寸。

由此可求出SBBS-PCR的往返一周自再现模参数，其模结构示意图于图3。

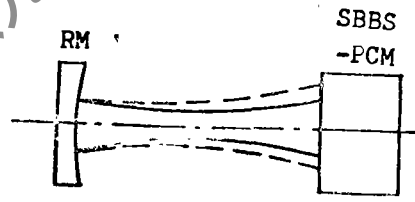
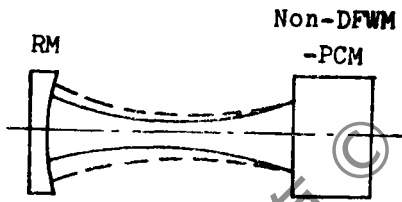


图2 非简并四波混频形成PCR的模结构

图3 受激布里渊背散射形成PCR的模结构

使用 (32) 式时，由于忽略了频移效应，不能解释在SBBS-PCR中不可能存在任意多次往返传输自再现模之类的实验现象。如果引入带有频移参量的等效变换矩阵和相应的自再现条件，则从物理上讲，这时的自再现意义已有所不同了。因为通常的自再现条件，是指在稳定振荡建立之后，任意的往返一周前后模参数的自再现。而在 (32) 式中引入频移参量后，应是指在受到光腔的增益和损耗特性曲线限制的频率范围内，某次往返前后模参数的自再现，计算结果依赖于所取往返的序数。对这一问题，还值得进一步加以研究。

3. 双相位共轭腔

对形成DPCR的两个PCM，要求必须有相同的泵浦频率，这样避免了频率溢出 (frequency walk off) 效应〔8〕，而有往返一周自再现本征模 (简并和非简并模) 存在。

五、相位共轭腔的稳定性

1. 约束稳定性

定义 $G_2 = d - b/R_{PCM}$ (33)

后，由 (18)、(22) 式得 $G_1 G_2 = 1/2$ (34)

可以证明,除了非简并和DPCR外,(34)式对一般的PCR都是成立的。因此,通常认为,PCR是无条件稳定的(unconditionally stable)^[7]。但是应当注意,由于PCM的曲率半径非常数,具有自适应变化特性,尽管光斑尺寸 w_{PCM} , w_{RM} 会出现奇异现象,但(34)式却始终成立。因此,若使用常规光腔的术语来讨论光腔的稳定和非稳定性时,可以认为, G 参数满足(34)式的PCR是约束稳定的,但使光斑尺寸 $\rightarrow 0$ 、 ∞ 的那些奇异点应除外,计算例子请见文献[6]。

2. 热稳定性

通常所指的热稳定性是指光腔输出激光束对腔内热扰动的稳定性。以弱高斯光阑近似下由DFWM形成的PCR为例,设腔内有一焦距为 f 的热透镜,其腔内单程变换矩阵为(图4)

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix} \quad (35)$$

式中, $\begin{pmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{pmatrix}$ ($i=1, 2$) 为热透镜两侧的变换矩阵。按Steffen的方法^[10],当输出镜RM“匹配”时,基模热稳的必要条件为

$$dw_{RM}/df = 0 \quad (36)$$

将(19)、(35)式代入(36)式,直接求导,经运算得到

$$b_2 = 0 \quad (37)$$

(34)、(37)式即为DFWM-PCR的基模热稳条件。进一步的分析表明^[11],它也是SBBS-PCR自泵浦四波混频形成PCR的热稳条件。注意,(34)、(37)式说明,仅有(34)式并不能保证PCR热稳,应当加上(37)式,即热扰源尽可能靠近PCM(而不是RM!)时,PCR才是热稳的。

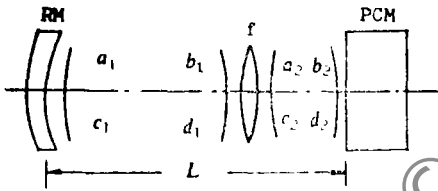


图4 含热透镜的PCR

3. 微扰稳定性

对于PCR的微扰稳定性问题,应当根据Casperson的定义^[12],利用微扰参量

$$F = |2G_1G_2 - 1 \pm 2\sqrt{G_1G_2(G_1G_2 - 1)}| \quad (38)$$

来判断。例如,对仅有实元件非简并情况的两次往返本征模, $F=1$,是临界微扰稳定的。对腔内有虚元件的往返一周自再现模, $F>1$,是微扰稳定的。对DPCR的微扰稳定性及有关问题的讨论请见文献[13]。

参 考 文 献

- [1] Auyeung J, Fekete D, Yariv A *et al.* A theoretical and experimental investigation of the modes of optical resonators with phase-conjugate mirrors. IEEE J Q E, 1979; QE-15 (10): 1186
- [2] Wang Shaomin, Weber H. Matrix optics. Physik-Verlag (to be published)
- [3] Fisher R A. Optical phase conjugation. New York: Academic Press,

1983; 466

- [4] Waidelich W. *Optoelektronik in der technik*. Springer-Verlag, 1987, 53
- [5] 卢亚雄, 吕百达. 矩阵光学. 大连: 大连理工大学出版社, 1989; 270
- [6] 吕百达, 蔡邦维, 王绍民. 弱高斯光阑近似和相位共轭腔的基本性质. *中国激光*, 1988, 15 (9): 544
- [7] Belanger P A. Phase conjugation and optical resonators. *Opt Engng*, 1982, 21 (2): 266
- [8] Wang Shaomin, Weber H. Fundamental modes of stimulated scattering phase-conjugate resonators. *Opt Acta*, 1984, 31 (9): 971
- [9] Cronin-Colomb M, Fisher B, Yariv A. Nondegenerate optical oscillation in a resonator formed by two phase-conjugate mirrors. *Opt Lett*, 1985, (10): 353
- [10] Steffen J, Lörtscher J P, Herziger G *et al.* Fundamental mode radiation with solid-state lasers. *IEEE J Q E*, 1972, QE-8 (2): 239
- [11] 吕百达, 蔡邦维, 王绍民. 相位共轭光腔的热稳定性. *光学学报*, 1988, 8(2): 140
- [12] Casperson L W. Mode stability of lasers and periodic optical systems. *IEEE J Q E*, 1974, QE-10 (9): 629
- [13] 林强, 王绍民, 吕百达. 双相位共轭光腔的横模及其特性. *杭州大学学报*, 1988, 15 (3): 293

*

*

*

作者简介: 吕百达, 请见本刊1987年第4期第33页。

蔡邦维, 请见本刊1987年第5期第14页。

周兴灵, 男, 1965年10月出生。研究生。从事非线性光学及光谱学、固体激光器等方面的研究工作。

收稿日期: 1989年12月20日。

· 简 讯 ·

监视器/控制器

由Vanzetti System公司制造的3900型YAG激光控制器是无接触或红外温度测量系统, 它可控制激光加热物体的温度。将用户从面板上设置的控制温度与实际目标温度相比较, 然后将校正信号发送到激光功率控制组件上。该装置可测量加热物体的辐射而不受激光能量的影响。

译自 L F World, 1990, Aug; 177

于祖兰 译 松明 校