

时空域位相调制型光学谐振腔的模式*

王立刚 林 强 王绍民

(浙江大学物理系 杭州 310028)

提要 提出一种含有时空位相调制元件的光学谐振腔,利用空间-频率域的相干模式理论对这种谐振腔的模式作了分析和数值模拟。结果表明,对固定位相片,腔内光场是完全相干的,在一定参数下,在一镜面上可得到平顶光束;对随机微扰型位相片,输出模式是部分相干的,在合适参数下,也可得到平顶光束。

关键词 位相调制型光学谐振腔,相干模式理论,平顶光束

1 引 言

研究光腔模式的传统方法是基于衍射理论的 Fox-Li 方法,该方法把腔内光场视为严格的单色光^[1]。而光腔内的实际模式并不是严格的单色光。在某些情况下,并不要求激光的单色性很好,因为单色性越好,越容易引起散斑等使光强分布不均匀。在实际应用中,如激光材料表面热处理、惯性约束核聚变(ICF)的靶面辐照等,常要求光斑强度分布非常均匀。

近年来,国内外提出了多种提高光束均匀性的方法,如利用二元光学元件^[2,3]、全息光学元件或随机位相片^[4]等把高斯光束变换成平顶光束^[5]或超高斯光束^[6];利用列阵光学元件^[7]、随机偏振控制板^[8]改善 ICF 中的照明均匀性;利用腔内渐变反射率镜^[9]、渐变位相镜^[10]、内置活动镜^[11]等也可得到中心强度均匀的超高斯型光束。最近我们利用旋转随机位相片实现了多模光束的均匀化^[12~14]。

本文提出一种带有时空位相调制元件的光学谐振腔,并利用 E. Wolf 等建立的空间-频率域的相干模式理论^[15~17]模拟腔内模式。结果表明,对于内置固定位相片,在一定条件下可在—镜面上得到平顶光束;对于内置随时间变化的微扰型位相片,可得到部分相干的平顶光束。

2 带位相反射镜光腔的模式

在傍轴近似条件下,交叉光谱密度的传输公式为

$$W(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \nu) = \frac{1}{\lambda_0 z^2} \iint W_0(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \nu) \exp\left[\frac{ik}{2z}[(\vec{r}_1 - \vec{\rho}_1)^2 - (\vec{r}_2 - \vec{\rho}_2)^2]\right] d^2 \vec{\rho}_1 d^2 \vec{\rho}_2 \quad (1)$$

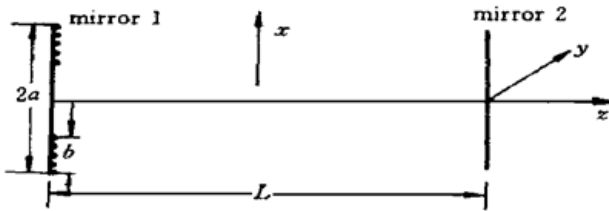
其中, z 为传输距离, λ_0 为光的波长, \vec{r}_1, \vec{r}_2 为入射平面坐标, $\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2$ 为接收平面坐标, W 为交叉光谱密度, ν 为频率。

* 浙江省青年科技人才培养专项资金(RC 198045)和浙江省自然科学基金(198045)资助项目。

收稿日期: 1999-07-11; 收到修改稿日期: 1999-08-25

图 1 为二维平行平面腔示意图,它的两个反射镜在 y 方向上为无限长,在 x 方向的宽度为 $2a$,腔长为 L 。用交叉光谱密度 $W(x, x', \nu)$ 表示的本征方程为

$$b_{m+1}W_{m+1}(x_2, x_2', \nu) = \frac{1}{\lambda_0 L} \int_{-a}^a \int_{-a}^a W_m(x_1, x_1', \nu) \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2L}[(x_2 - x_1)^2 - (x_2' - x_1')^2] + \mathcal{Q}(x_1) - \mathcal{Q}(x_1')\right\} dx_1 dx_1' \quad (2)$$



其中, x_1, x_1', x_2, x_2' 为相应镜面上的坐标, $\mathcal{Q}(x)$ 为腔镜上的位相函数, m 为振荡次数。经过一周往返后的损耗为

$$\delta = 1 - b_{m+1} \quad (3)$$

当 $W(x, x', \nu)$ 在振荡过程中趋于稳定时,利用(3)式可得模式损耗。在 x 处的强度为

$$I(x) = G(x) = W(x_i, x_j, \nu) \Big|_{i=j} \quad (4)$$

利用相干模式理论可以方便地得到光束的空间相干度

$$\mu(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \frac{W(\vec{r}_1, \vec{r}_2)}{\sqrt{G(\vec{r}_1)G(\vec{r}_2)}} \quad (5)$$

其中, \vec{r}_1, \vec{r}_2 为空间位置矢量, $G(\vec{r}) = W(\vec{r}, \vec{r})$ 。

对于 $\mathcal{Q}(x)$ 为固定位相时,交叉光谱密度经多次振荡后将趋于稳定。而当 $\mathcal{Q}(x, t)$ 随时间变化时,也即每次振荡 $\mathcal{Q}(x, t)$ 都改变时,一周往返的交叉光谱密度一般不能稳定,但在一定时间间隔内的平均值将趋于稳定,从而求出其平均损耗、平均强度及相干度。下面我们将对带有位相调制反射镜的二维平行平面腔的模式进行数值模拟,在计算中参数取为:腔长 $L = 1000.0$ mm,波长 $\lambda_0 = 10.6 \mu\text{m}$ 。

2.1 无位相分布时相干模式理论与 Fox-Li 方法的比较

为了检验由(2)式表达的交叉光谱密度的本征方程的适用性,我们首先对腔镜上无位相分布的空腔模式分别用(2)式和 Fox-Li 方法作了计算。图 2(a), (b) 分别是菲涅耳数 $N = 2$ 和 5 时腔镜上的光强分布曲线。从图中可以看出,两种方法的结果是完全一致的,损耗也相同。

2.2 带固定位相反射镜光腔的模式

如图 1 所示,在镜 1 的外圈部分加正弦型位相

$$\mathcal{Q}(x) = \begin{cases} \pi \sin\left[\frac{q\pi x}{a}\right] & |x| > a - b \\ 0 & |x| \leq a - b \end{cases} \quad (6)$$

其中, $2a$ 为镜面宽度, b 为位相区宽度, q 为位相函数在整个镜面上的周期个数。利用交叉光谱密度的本征方程(2)式和(4)式计算了腔镜上的光强分布,结果如图 3 所示。图 3(a) 是在菲涅耳数 $N = 2, q = 10$ 时,镜 1 上位相区域宽度 b 不同的光强分布;图 3(b) 是镜 2 上的光强分布。从图中可以看出,通过选择合适的位相区域宽度 b ,可使镜 2 上的光强分布为平顶光束。

带固定位相反射镜光腔的损耗随 b 值的增大而增大, $b = 0.15a$ 时,损耗为 8.2%; $b = 0.25a$ 时,损耗为 14.1%; $b = 0.30a$ 时,损耗为 16.9%。在菲涅耳数 N 不同时,为在镜 2 上得到平顶光束输出,最佳的位相区尺寸 b 值随 N 的增大而增大。值得指出的是,对于固定位相反射

镜光腔, 它的空间相干度仍为 1。这表明带固定位相反射镜的光腔模式仍然是完全相干的。

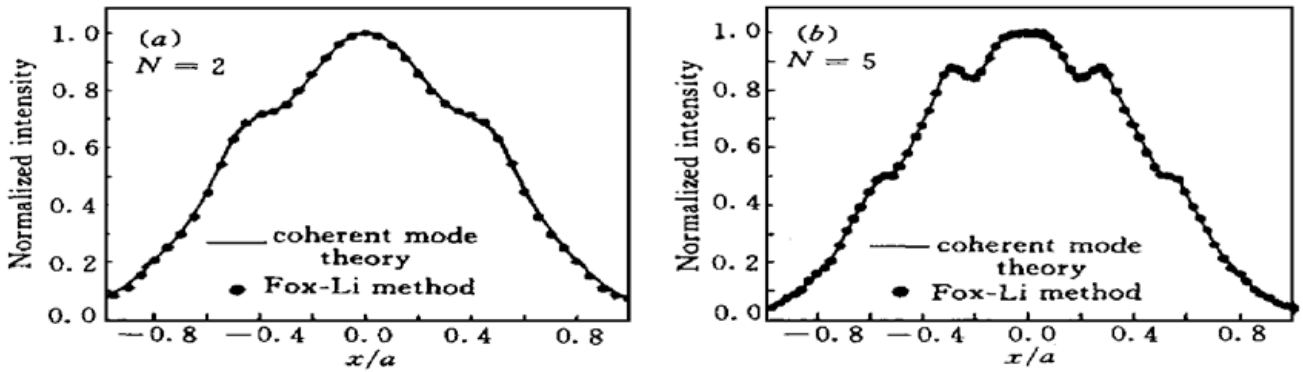


图 2 相干模式理论与 Fox-Li 方法的比较

Fig. 2 Comparison of coherent mode theory and Fox-Li method

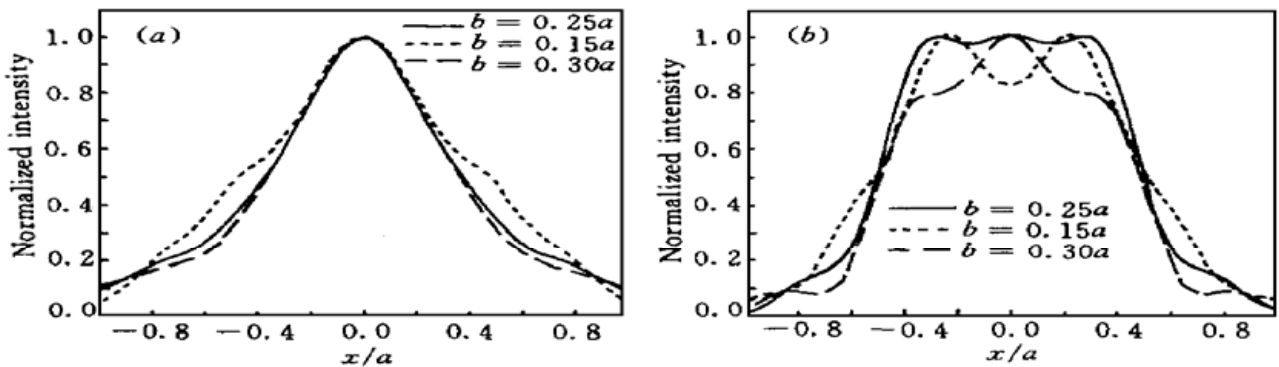


图 3 带固定位相反射镜光腔两镜面上的光强分布

(a) 镜 1; (b) 镜 2

Fig. 3 Intensity distribution on two mirrors for resonators with fixed phase mirror

(a) mirror 1; (b) mirror 2

2.3 带随时间变化位相反射镜光腔的模式

在固定型位相片上, 加一个干扰项 $\delta(t)$, 使位相随时间变化

$$\mathcal{Q}(x, t) = \begin{cases} \pi \sin \left[\frac{q\pi x}{a} + \pi\delta(t) \right] & |x| > a - b \\ 0 & |x| \leq a - b \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\delta(t)$ 每周往返改变一次, 取值范围为 0~ 1 之间的随机数, 我们称这种位相片为随机微扰位相片。实验中, 随机位相干扰 $\delta(t)$ 可通过晶体(如 LiNbO_3) 的电光效应来实现, 即在晶体上加随时间变化的电场, 使其折射率发生改变, 从而达到改变位相的目的。

与 2.2 节一样, 随机微扰位相片加在镜 1 上, 而镜 2 上不加。这时交叉光谱密度 $W(x_1, x_2)$ 往返一周不再是稳定的, 而是振荡的。但计算结果表明在一段时间内的平均值 $W(x_1, x_2)$ 却是趋于稳定的, 因而可求出平均光强 $I(x)$ 及平均相干度 $\bar{\mu}(x_1, x_2)$ 。计算结果如图 4 所示, 计算中取 $N = 2, q = 10$ 。

从图 4 可以看出在镜 2 上的光强分布与平均的次数有关, 次数越多光束的平顶化程度越好, 而镜 1 上却几乎没有变化。两镜面上的光强分布规律与固定位相时基本一致, 但光束的相

干性却发生了很大变化。当菲涅耳数 N 较小时, 镜 1 上得到的光束几乎完全相干, 但随 N 的增大, 其相干性降低, 且两点之间距离越大, 相干度越低, 腔镜边缘附近点与其他区域点之间的相干性较腔镜中心附近点之间差。对于镜 2 上光束的相干性也有类似规律, 但镜 2 上的相干度明显比镜 1 上的低。图 5 为菲涅耳数 $N = 5$ 时两镜面上的相干度分布。因此, 带随机微扰位相反射光腔的输出光束是部分相干的平顶光束。

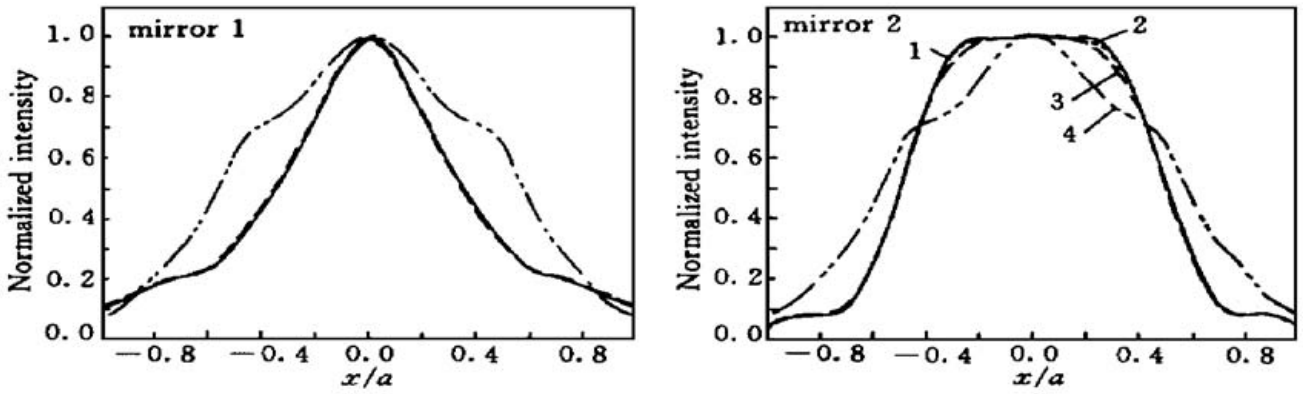


图 4 带随机微扰位相反射光腔的模式

Fig. 4 Mode of resonators with random disturbed phase mirror

1: 50 times average; 2: 20 times average; 3: only one time; 4: without phase plate

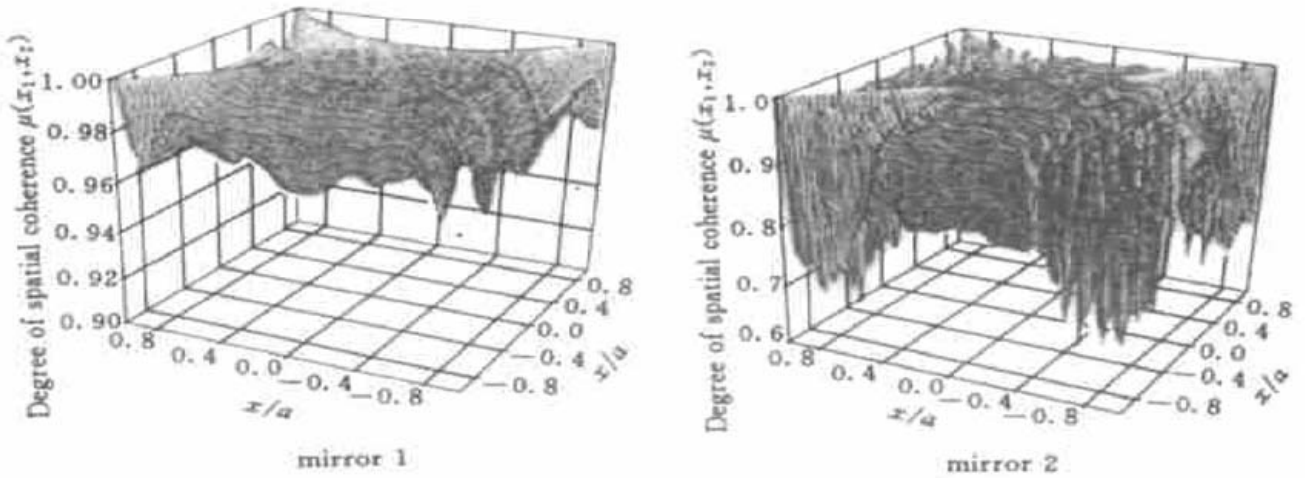


图 5 带随机微扰位相反射光腔两镜面上的相干度分布

Fig. 5 Coherence degree distribution on two mirrors for resonators with random disturbed phase mirror

3 小 结

本文提出了一种带正弦型固定位相反射镜和随机微扰位相反射镜的光腔模型, 并利用相干模式理论计算了带时空位相调制的二维平行平面光腔的模式。结果表明, 对固定位相调制, 腔内光场是完全相干的, 且在合适参数下, 可得到平顶光束; 对随机微扰型位相片, 输出模式是部分相干的, 在合适参数下, 也可得到一平顶光束。对其他类型位相分布函数的光腔也可作类似分析。

致谢 作者感谢江晓清副教授、周国泉博士生等的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 A. G. Fox, T. Li. Resonant modes in a maser interferometer. *Bell Syst. Tech. J.*, 1961, **40**: 453~ 488
- 2 W. B. Veldkamp. Laser beam profile shaping with interlaced binary diffraction gratings. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(17): 3209~ 3212
- 3 J. Cordingley. Application of a binary diffractive optic for beam shaping in semiconductor processing by lasers. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2538~ 2542
- 4 S. N. Dixit, I. M. Thomas, B. W. Woods *et al.*. Random phase plates for beam smoothing on the Nova laser. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2543~ 2554
- 5 F. Gori. Flattened Gaussian beams. *Opt. Commun.*, 1994, **107**(5, 6): 335~ 341
- 6 C. Palma, V. Bagini. Propagation of super-Gaussian beams. *Opt. Comm.*, 1994, **111**(1, 2): 6~ 10
- 7 Deng ximing, Liang xiangchun, Chen Zezun *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~ 381
- 8 Zhongyong Liu, Yu Zhao, Dianyuan Fan. Improvement of the illumination uniformity in ICF using a random polarization control plate. *Opt. Comm.*, 1998, **152**(1/3): 1~ 5
- 9 M. S. Bowers. Diffractive analysis of unstable optical resonators with super-Gaussian mirrors. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(19): 1319~ 1321
- 10 P. A. Bélanger, R. L. Lachance, C. Paré. Super-Gaussian output from a CO₂ laser by using a graded-phase mirror resonator. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(10): 739~ 741
- 11 T. Y. Cherezova, S. S. Chesnokov, L. N. Kaptsov *et al.*. Super-Gaussian laser intensity output formation by means of adaptive optics. *Opt. Comm.*, 1998, **155**(1/3): 99~ 106
- 12 Lin Qiang, Jiang Xiaoqing, Zhu Jingmin *et al.*. Laser beam smoothing by a rotating random phase plate. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(10): 901~ 904 (in Chinese)
- 13 Wang Ligang, Yu Liping, Zhou Guoquan *et al.*. Simulation on smoothing of multimode laser beam based on partial coherence theory. *Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 1999, **10**(2): 122~ 124 (in Chinese)
- 14 Lin Qing, Jiang Xiaoqing, Zhu Jingmin *et al.*. Laser beam smoothing by rotating random phase plate. *SPIE*, 1998, **3550**: 429~ 432
- 15 E. Wolf. New theory of partial coherence in the space-frequency domain. Part I: spectra and crossspectra of steady-state sources. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(3): 343~ 351
- 16 E. Wolf. New theory of partial coherence in the space-frequency domain. Part II: steady-state fields and higher-order correlations. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(1): 76~ 85
- 17 E. Wolf, G. S. Agarwal. Coherence theory of laser resonator modes. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1984, **1**(5): 541~ 546

Mode of Resonators with Spatial-temporal Phase Modulation

Wang Ligang Lin Qiang Wang Shaomin

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310028)

Abstract A kind of resonator with spatial-temporal phase modulation is proposed. The modes of this kind of resonator are analyzed and calculated numerically in terms of the modal theory of coherence in space-time domain. The results show that the modes are completely coherent under fixed phase modulation on one mirror of resonator. There is a suitable value of resonator parameter to obtain flat-top beam on one mirror. For resonators with random disturbed phase mirror, its modes are partially coherent, and there also exists a suitable parameter to get flat-top beam.

Key words resonator with phase modulation, partial coherence, flat-top beam