

用增益介质多层分布法模拟非稳腔光束特性*

杜燕貽

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 8009 信箱, 100088)

摘要: 采用 FFT 方法和多层增益介质模块处理法研究了非稳腔下具有非均匀流动介质的高功率气体激光器的光束特性和光束质量, 该方法比增益介质近腔镜薄层处理法适用性更广。

关键词: FFT 方法; 多层增益介质; 光束质量

中图分类号: TN248; O437

文献标识码: A

在文献[1,2]中,用快速傅里叶变换(FFT)方法和增益介质近腔镜薄层处理法研究了常规非稳腔的光束特性和光束质量,证明它适用于低介质密度,小放大率的腔型。但对较大的放大率($m > 3$)和较大的扰动效应等更加广泛的研究就要求采用更为精确的方法描述实际腔型中的物理问题。本文采用增益介质多层分布法作进一步探讨。

1 理论模型

1.1 模型建立

沿光轴方向将谐振腔内增益介质等分成若干模块,每个模块的中心面为计算面,见图1,由于光束在腔内往返一次完成一个循环,故每个中心面计算两次,即从输出端的小镜面 M1 开始依次标号记为 $k = 1, 2, 3$, 到达大镜面 M2 后返回计为 $k = 4, 5, 6$ 。中心面以矩形网络点均匀划分,增益流沿 x 方向, y 方向取对称分布。相邻两个模块之间光束以自由空间传输处理,用快速傅立叶方法(FFT)计算,即用空间频谱的积分来表示波函数 $u(x, y)$,其空间频谱分布及传输方程见文献[1]。相邻模块中心面之间的累积增益函数设为 $g_k(x, y)$ 。复波函数 $u_1(x, y)$ 从 $k=1$ 处向 $k=2$ 处传输满足自由空间传输,到达 $k=2$ 处为 $u_2(x, y)$,然后乘以该面上的累积增益函数 $g_2(x, y)$,之后再向下一个 $k=3$ 模块以自由空间传输,再乘以 $g_3(x, y)$,如此下去完成整个传输。当波函数传输到任一镜面前时,在镜面上不考虑增益,而乘以复镜反射率(包括激光器的镜倾斜,可变反射率,孔径等效率)。在完成一次循环后得到的新的 $|u_k(x, y)|^2$ 用来计算新的增益分布,再用新的增益分布进行下一个循环,如此迭代下去,直到波振幅和增益分布收敛于一稳态解^[1~3]。

为使 FFT 方法应用到非稳腔球面波传输,采用了非稳腔球面波理论的展宽坐标系描述,即基于高斯光束理论的坐标变换方法^[4],如图1,当 z_1 面的波函数 $u_1(x_1, y_1, z_1)$ 传输到 z_2 面,有

$$u_2(x_2, y_2, z_2) = P(x_2, y_2, x_1, y_1, z_2 - z_1)u_1(x_1, y_1, z_1) \quad (1)$$

P 为传输核,上式满足自由空间传输的近轴波传输方程。对球面波传输,可看成是从 P_1 点的扩散中心向左传输,由此定义一个新的波函 $w(x, y, z)$,其相位是一个中心在 P_1 处的球面波,再引入 $V(x, y, z) = (z/b)w(x, y, z)$, b 为任意常数,并设坐标变换 $X = ax/z, Y = ay/z, Z = a^2/z$ 。可以证明 $V(X, Y, Z)$ 同样满足方程(1),直接替换后得到球面波传输形式为

$$w(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{m_1} P(x_2, y_2, x_1, y_1, z_2 - z_1) w(x_1, y_1, z_1) \quad (2)$$

反向传输同理。

* 国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-4-4)
1999年11月10日收到原稿,2000年6月11日收到修改稿。
杜燕貽, 1965年3月出生,女,硕士,副研,从事激光物理研究

1.2 饱和和流动增益的计算

对 N₂-CO₂ 系统, A. E. Siegman 等人利用等效的三能级系统给出了饱和和流动非均匀增益系数的计算公式^[5]。对于 x 方向的稳态流, 描述三个相关粒子数密度空间变化的速率方程

$$v(\partial n_a / \partial x) = \Delta N - (\alpha + \Gamma)n_a - (\sigma I / h\nu)(n_a - n_b) \tag{3}$$

$$v(\partial n_b / \partial x) = -\beta n_a + (\sigma I / h\nu)(n_a - n_b) \tag{4}$$

$$v(\partial N / \partial x) = \Gamma n_a - \Delta N \tag{5}$$

式中 n_a, n_b, N 分别是 CO₂ 上下能级粒子数密度和 N₂ 的振动激发态粒子数密度, v 是介质流动速度, α, β 分别是上下能级弛豫率, Δ, Γ 分别是上能级的向前向后泵浦率, σ 是激光辐射的光学横截面, hν, I 分别是光子能量和光强。

泵浦速率与基态粒子数密度成正比, 即与 CO₂ 和 N₂ 的摩尔分数成正比, 用 Laplace 变换方法可求出方程组中 n_a, n_b, N 的解析解。对于反转状态下介质内的增益系数有 g(x, I) = (n_a - n_b)σ, 可知, 要得到 g(x, I), 只需求 n_a, n_b 即可。假定介质仅沿 x 方向流动, 但若直接用 n_a, n_b 的解析解代入求解则相当繁杂, 因此给出两个假定条件: 在低能级衰减的特征长度上束的强度变化缓慢, 整个光腔内达到瞬时泵

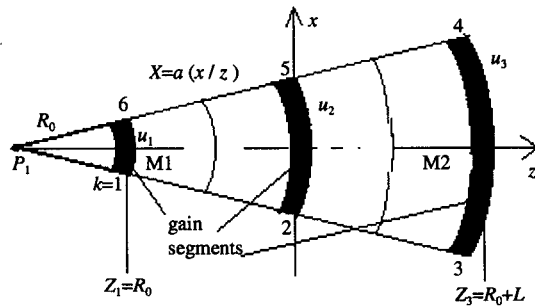


Fig. 1 The more gain segments method and unstable resonator model

图 1 多层增益分布及非稳腔球面波传输

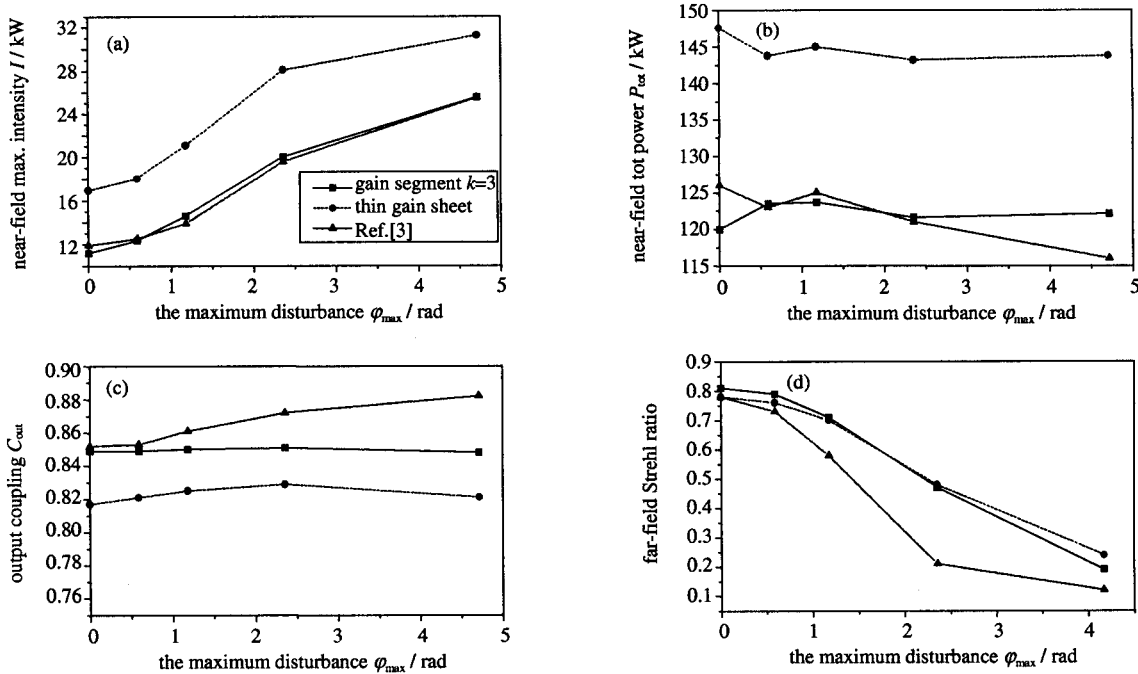


Fig. 2 Phase and intensity distributions just inside the output mirror for a loaded unstable resonator with density distorted in k=3 for CO₂

图 2 k=3 下近场峰值强度(a), 输出总功率(b), 输出耦合率(c)及远场 Strehl 比(d)

浦平衡。通过较为复杂的推导和近似等效, 得到腔内饱和和流动非均匀增益系数表达式

$$g(x) = \left[\frac{g_0(x)}{1 + W(x)} \right] \exp \left[- \frac{\chi_{CO_2} \beta}{\chi_{N_2} \nu} \int_{x_0}^x dx' \frac{W(x')}{1 + W(x')} \right] \tag{6}$$

$$g_0(x) = g_0(x_0) \exp \left[- \chi_{CO_2} \alpha (x - x_0) / (\chi_{N_2} \nu) \right] \tag{7}$$

$$W(x) = \sigma I(x) / (h\nu\beta) \tag{8}$$

符号 $g(x), g_0(x), g_0(x_0), W(x), \chi_{CO_2}, \chi_{N_2}, x_0, x$, 分别表示增益系数、小信号增益系数、光束上沿处的小信号增益系数、饱和光强、 CO_2 和 N_2 的摩尔分数、光束上沿沿 x 轴所在位置及腔内沿 x 方向任一位置。

相邻模块中心面之间的总的增益函数为 $g_k(x, y) = \exp[g(x, y)/2]$ 。

方程(6)中第一个方括号内即通常所说的在无流动激光介质内对非均匀展宽线性下的增益系数表达式,但由于实际上的小信号增益系数通常不是常数,而是随流体以指数衰减(方程 7)。故方程(6)包含了由于流动造成的修正因子即第二部分的指数形式。

2 计算结果

根据上述理论,我们编制了相关的计算程序,对 CO_2 激光器进行了模拟计算,并将其结果与增益介质近腔镜薄层处理法的计算结果进行了比较。

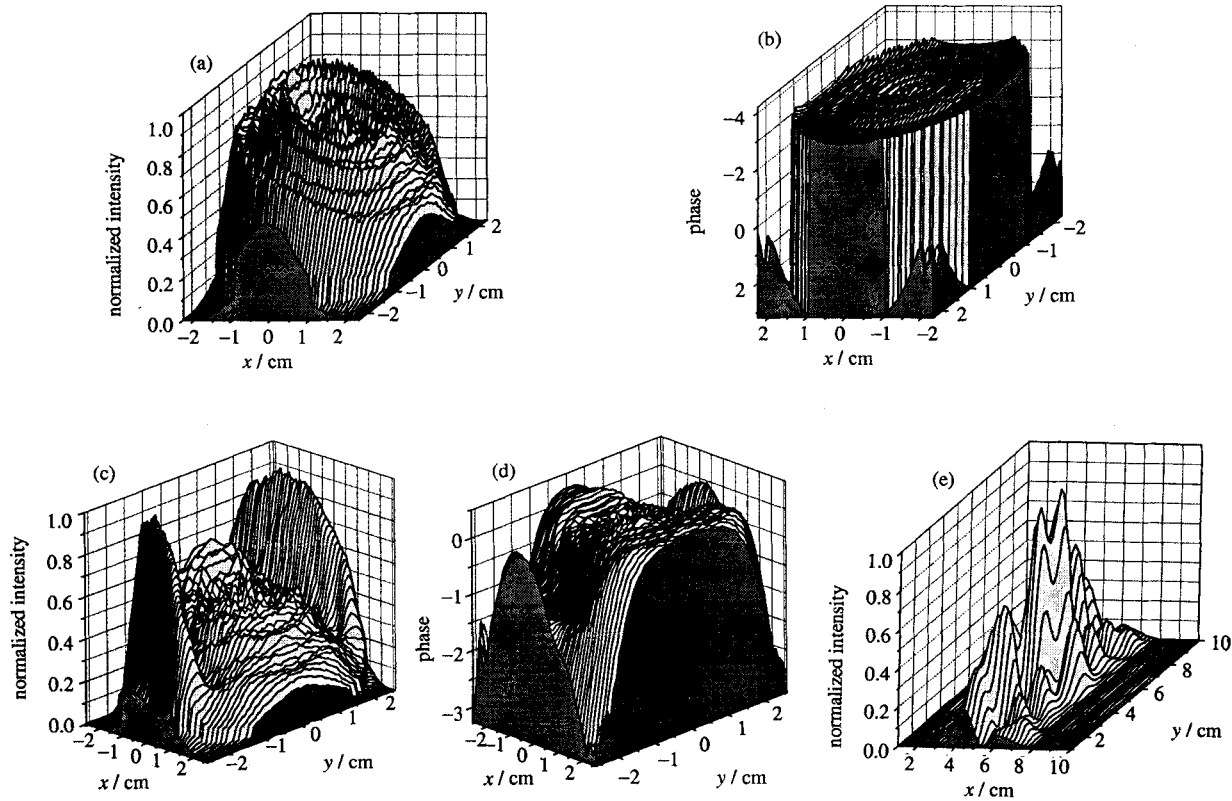


Fig. 3 Near-field intensity (a,c) and phase (b,d) distributions, and far-field intensity distribution (e) with different disturbance for CO_2

图 3 CO_2 激光器不同扰动下近场强度(a)(c)及相位分布(b)(d)及较大扰动下的远场强度分布(e)。

$N_{eq}=1.5, m=2.5, g_0L=4$. (a,b) $\varphi=0$; (c,d) $\varphi=\pi/2$, (e) $\varphi=3\pi/2$

10.6 μm CO_2 激光器选择的腔型尺寸为:等效菲涅耳数 $N_{eq}=1.5$,放大率 $m=2.5$,腔长 $L=400cm$,大镜半径 $a_2=2.3cm$,小镜半径 $a_1=0.92cm$,激光介质参数分别取 $\chi_{CO_2}=0.13, \chi_{N_2}=0.85, 1/\alpha=47\mu s, 1/\beta=5.2\mu s, v=1.55 \times 10^5 cm/s, \sigma=10^{-18} cm^2, g_0$ (镜中心处) $=0.01cm$ 。假设腔内存在激波效应^[2],设激波以高斯形式分布,两束激波成 X 型传输,激波中心的最大相位扰动为 φ_{max} ,图 2 给出增益分块 $k=3$ 时计算得到的近场和远场输出结果。对比文献[2],可以看出,其近场最大峰值强度 I ,近场输出总功率 P ,输出耦合率 C_{out} 都明显比近腔镜薄层法更精确(以文献[3]为参考)。 $k=3$ 下的远场 Strehl 比当扰动较大时仍有误差,这和分层的多少有关。计算表明当 $k>7$ 时,远场 Strehl ratio 即可较好吻合。扰动导致近场峰值强度明显增大,但相位畸变增加,远场光束质量明显变差。图 3 显示最大中心激波扰动 $\varphi_{max}=0, \pi/2$ 的近场光强和相位变化,与薄层法^[2]的 Fig. 3, Fig. 5 相比,计算精度提高(参考文献[3])。扰动增大,远场光束发散度也明显增大,见图 3(e)。

当腔镜倾斜时,取大镜沿 x 方向倾斜 $\theta_{2x}=50$, $100\mu\text{rad}$,计算无扰动时的输出,从表 1 可以看到,当 $\theta_{2x}=50\mu\text{rad}$,其近场可输出的功率略高于无倾斜时的。即说明适当的倾斜可以改善近场光束均匀度。图 4 给出倾角为 $50, 100\mu\text{rad}$ 下的近场光强、相位分布,其补偿程度优于文献[2]的结果。

表 1 $N_{\text{eq}}=1.5$ 有源腔大镜倾斜下的计算结果Table 1 The output power with only big mirror tilt, $N_{\text{eq}}=1.5$

tilt angle/ μrad	output power/kW	Strehl ratio
0	104.2	0.81
50	111.1	0.60
100	101.6	0.17

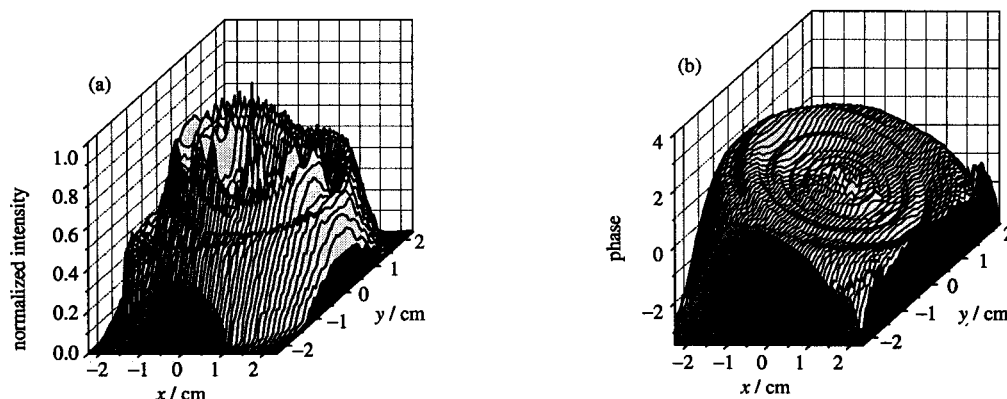


Fig. 4 Phase and intensity distributions just inside the output mirror with output mirror tilt

图 4 大镜倾斜对近场强度,相位分布的补偿, $\theta_{2x}=50\mu\text{rad}, N_{\text{eq}}=1.5, m=2.5, g_0L=4$

3 讨论

多层法比薄层法的计算精度高,应用更为广泛,分层的多少与计算条件及精度有关,但是,分块越多计算量越大,对大裴涅耳耳数的激光器尤为明显。利用该程序还可计算 COIL 的光束特性及分布。

致 谢 本工作得到了王元璋研究员的悉心指导和束小建研究员,李有宽、李守先副研究员及同组其他同志的热情帮助,特此感谢。

参考文献:

- [1] 杜燕怡. 无源虚共焦非稳腔光束特性模拟[J]. 强激光与粒子数, 2000, 12(2):164.
- [2] 杜燕怡. 用薄层处理法模拟有源共焦非稳腔[J]. 强激光与粒子数, 2000, 12(3):301~305.
- [3] Sziklas E A, Siegman A E. Mode calculations in unstable resonators with flowing saturable gain. 2:Fast Fourier transform method [J]. *Appl Opt*, 1975, 14(8):1874.
- [4] Perkins J F, Shatas R A. Propagation in unstable and plane-mirror optical resonators[J]. *Appl Phys*, 1976, 9:343.
- [5] Sziklas E A, Siegman A E. Mode calculations in unstable resonators with flowing saturable gain. 1:Hermite-Gaussian expansion [J]. *Appl Opt*, 1974, 13(8):2275.

STIMULATION OF BEAM USING MORE GAIN SEGMENTS METHOD IN CONFOCAL UNSTABLE RESONATOR

DU Yan-yi

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P.O. Box 8009, Beijing, 100088 China

ABSTRACT: Mode calculation in unstable resonators with flowing saturable gain using the Fast Fourier transform (FFT) algorithm and more gain segments method in resonator. This method had more wide-ranging applied.

KEY WORDS: FFT algorithm; more gain segments; beam quality