

文章编号: 1001-3806(2004)04-0390-04

变反射镜谐振腔光场分布的三维数值计算

田兆硕^{1,2}, 陈卫标¹, 胡企铨¹

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; 2. 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 在几何光学的基础上设计了变反射镜谐振腔激光器, 并利用衍射光学理论, 将腔内光束模式满足的方程表为易于通过快速傅里叶变换迭代求解的形式, 以高斯型、超高斯型变反射镜为例, 求出激光在反射镜、输出镜、近场、远场光场分布的三维数值解, 为变反射镜谐振腔设计提供了直观的参考。

关键词: 变反射镜谐振腔; 数值模拟; 光场分布; 衍射理论

中图分类号: TN242 **文献标识码:** A

3-D numerical simulation of optic field distribution in unstable resonators with variable reflectance mirrors

TIAN Zhaoshuo^{1,2}, CHEN Wei-biao¹, HU Qi-quan¹

(1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: On basis of geometry optics, we designed unstable resonators with Gaussian and super-Gaussian variable reflectance mirrors. The mode equations in the cavity is obtained by FFT expressions so as to be easily solved. The 3-D optic intensity distributions in near and far field, as well as reflecting from reflectors, output mirrors, are numerically calculated. These results can be used as available references for design of unstable resonators with variable reflectance mirrors.

Key words: unstable resonators with variable reflectance mirrors; numerical simulation; optic field distribution; diffraction theory

引 言

如何同时获得高功率、高光束质量的激光输出一直是研究的热点, 稳定谐振腔往往二者矛盾比较突出, 即: 如果激光器功率高, 往往是多模输出, 光束质量差; 而获得高光束质量的基模输出, 则限制了增益介质的激活体积, 输出激光功率低。非稳谐振腔的出现是一个较好的解决方法, 它能使单模运转体积充满整个介质, 并以平面波输出。但是比较常见的非稳腔(如卡塞格林望远镜谐振腔)输出的激光束近场往往是环形, 能量不均匀, 远场产生衍射环, 能量分布分散, 大约只有 50% 的能量保留在中央分布区内。而变反射输出镜非稳腔可以输出分布光滑的激光束, 可以使大部分能量集中在中央亮斑, 是谐振

腔技术的重大进展, 并且得到广泛应用^[1~5]。

目前, 变反射镜非稳腔的光场分布多采用几何光学分析方法, 而几何光学忽略了腔内光束的受限条件, 如忽略了增益介质、反射镜、输出镜边缘对于光束的衍射效应, 因此, 实际的光场分布与几何光学计算结果不完全一致, 并且衍射效应越大, 误差也越大。PARENT 等人应用衍射光学方法计算了高斯输出镜谐振腔内光强二维分布^[6], SILVERSTRI 等人采用衍射光学方法计算了超高斯镜谐振腔内光强二维分布^[7], 并且在几何光学基础上计算了输出激光的近场、远场光强分布。

作者利用衍射理论, 将激光腔内光束模式满足的方程表为易于通过快速傅里叶变换迭代求解的形式, 以高斯型、超高斯型变反射镜为例, 求出激光在反射镜、输出镜、近场、远场光场分布的三维数值解, 为变反射激光镜腔设计提供直观的参考。

1 几何光学分析

变反射镜一般是在光学基片上镀中心轴对称渐

作者简介: 田兆硕(1970-), 男, 博士, 副教授, 现从事激光技术和激光雷达等方面的研究。

E-mail: tianzhaoshuo @0451.com

收稿日期: 2003-07-11; 收到修改稿日期: 2003-11-27

变分布的介质膜,其反射率与镜片的径向坐标满足一定的函数关系,比较常见的有 Gaussian 型、超高 Gaussian 型、抛物线型变反射镜^[8]。

高 Gaussian 型、超高 Gaussian 型变反射镜的反射率分布为:

$$R(r) = R_{\max} \exp[-2(r/w_m)^n] \quad (1)$$

式中, R_{\max} 为中心峰值反射率, r 为距中心距离, w_m 为镜面反射率降到峰值的 $1/e^2$ 时的径向距离, n 为高 Gaussian 分布的阶数。 $n=2$ 时为高 Gaussian 分布; $n>2$ 时为超高 Gaussian 分布。

几何光学近似情况下,光腔振荡模式满足自洽场方程:

$$\sigma u(r) = \frac{1}{M^p} \left(\frac{r}{M} \right) u \left(\frac{r}{M} \right) \quad (2)$$

式中, $u(r)$ 为入射到变反射镜上的场振幅, M 是谐振腔放大率, σ 为本征值, $\rho(r) = \sqrt{R(r)}$ 为输出镜的场反射率。(2) 式的基模解可以表示为 $\rho(r)$ 的无穷乘积形式:

$$u_0(r) = A \prod_{k=1}^{\infty} \frac{\rho(r/M^k)}{\rho(0)} \quad (3)$$

式中, A 为幅值因子。本征值为:

$$\sigma_0 = \rho(0)/M \quad (4)$$

往返损耗为: $\gamma = 1 - \sigma_0^2 = 1 - R_0/M^2$ (5)

入射到输出镜的基模高 Gaussian、超高 Gaussian 光束分布为:

$$u_i(r) = A \exp[-(r/w_i)^n] \quad (6)$$

式中,束腰为: $w_i = (M^n - 1)^{1/n} w_m$ (7)

理论研究表明,介质口径边缘处的光场强度与中心最大的光场强度比值为 0.2% ~ 13% 时,可以忽略激光棒口径带来的衍射效应的影响。 w_i 取值应当满足尽量提高增益介质的填充因子,并且还要降低口径衍射的影响。

光强近场分布表达式为:

$$I_n(r) = [1 - R(r)] I_0 \exp[-2(r/w_i)^n] \quad (8)$$

光强远场分布的解析解非常复杂,有关文献中只给出了高 Gaussian 反射镜输出的远场光强的近似解析解^[7,8]:

$$I_n(\theta) = I_n(0) \left\{ \exp\left(\frac{-\theta^2}{2\theta_0^2}\right) - \frac{R_0}{2(2M^2 - 1)} \times \exp\left[\frac{-\theta^2}{2\theta_0^2(2M^2 - 1)}\right] \right\}^2 \quad (9)$$

式中, $\theta_0 = \lambda/2\pi w_i$ 。

2 激光谐振腔设计

设计的变反射镜谐振腔结构如图 1 所示, Yb:YAG 激光棒靠近全反镜一端,棒长为 70mm,直径为 6mm。由于全反镜一端光束受激光棒限制,可以

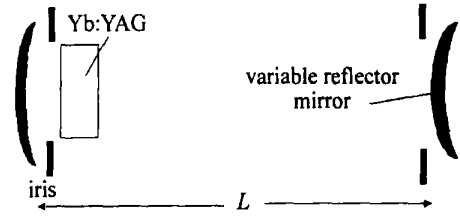


Fig. 1 Schematic of unstable resonators with variable reflectance mirrors

认为其光阑直径为 6mm,输出镜一端光束受固定支架的限制,设镜架的直径为 8mm。下面分别介绍高 Gaussian 型、超高 Gaussian 型变反射镜非稳腔的几何光学设计方法。

2.1 高 Gaussian 型变反射镜非稳腔设计

假设稳定谐振腔最佳输出镜透过率 $T_{opt} = 75%$, 由(5)式得: $M = 1.41$ 。满足平顶条件的输出镜最佳透过率 $R_0 = 50%$ 。根据(6)式、(7)式入射到输出镜的基模高 Gaussian 光束束腰 w_i 与 w_m 相等,当介质口径边缘处的光场强度与中心最大的光场强度比值为 2% 时, $w_i = w_m = 2.1\text{mm}$ 。由此可以得出高 Gaussian 输出镜的反射率分布曲线。根据(8)式可以计算出激光近场光强分布呈现平顶输出光束。

高 Gaussian 输出镜曲率半径一般选取为容易加工的数值,文中选取高 Gaussian 输出镜曲率半径 $R_2 = -3000\text{mm}$, 由正分支非稳腔放大率 M 与谐振腔镜曲率半径的关系^[8]可以推出 $L = 621\text{mm}$, 全反镜曲率半径 $R_1 = 4243\text{mm}$ 。

2.2 超高 Gaussian 型变反射镜非稳腔设计

对于超高 Gaussian 非稳腔,首先应该确定几何放大率 M 的选取,综合考虑 M 与模式分辨、对准灵敏度、输出损耗及平顶条件的关系, M 选取太大,则输出损耗大; M 选取太小,则模式分辨差、对准灵敏度低。折中考虑实际条件及参考有关文献,选取 $M = 1.6$ 。根据 SILVERSTRI 等人的分析,超高 Gaussian 光束的阶数取值越大输出能量越高,在 $n=10$ 达到饱和,而 n 取值越大光束质量也越差,文中取 $n=8$ 。根据(6)式当介质口径边缘处的光场强度与中心最大的光场强度比值为 2% 时,入射到输出镜的基模超高 Gaussian 光束束腰 $w_i = 2.7\text{mm}$ 。 R_0 的选取应在由平顶条件决定的反射率与稳定谐振腔最大输出能量决定的反射率之间权衡,由(7)式可以计算出 $w_m = 1.73\text{mm}$, 代入(7)式可以计算出满足平顶条件的反射率为 2.3%, 可见如果超高 Gaussian 反射镜满足平顶条件则远离最佳输出镜透过率,因此超高 Gaussian 输出镜中心透过率一般选择接近最佳输出,虽然近场光束分布具有凹陷,但是远场分布具有高 Gaussian 形状。对于稳定谐振腔获得最佳

输出能量的透过率大约为 75%，根据(5)式， $R_{max} = 64%$ ，文中取 $R_0 = 50%$ 。由此可以得出超高斯输出镜的反射率分布曲线。根据(8)式可以计算出近场光强分布呈现凹陷的输出光束。

超高斯输出镜曲率半径一般选取为容易加工的数值，文中选取超高斯输出镜曲率半径 $R_2 = -2000\text{mm}$ ，由正分支非稳腔放大率 M 与谐振腔镜曲率半径的关系^[8]可以推出 $L = 600\text{mm}$ ，全反镜曲率半径 $R_1 = 3200\text{mm}$ 。

3 光场分布的数值计算

以图 1 所示的激光谐振腔为例计算腔内外光场分布，左侧全反射镜的曲率半径为 R_1 ，右侧变反射镜的曲率半径为 R_2 ，设 $u_1(x_1, y_1), u_2(x_2, y_2)$ 分别为光波在谐振腔内传播时到达全反镜、输出镜表面的光场， $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2)$ 分别为两个谐振腔镜的光瞳函数，如果形成稳定的激光振荡，当光波在腔内经过足够多次的往返回到初始平面时，必须自再现光波场的初始相位分布和振幅分布^[9]。利用衍射光学理论及标准追迹公式，可以将自在现光波场表示为易于通过快速傅里叶变换迭代求解的形式：

$$\gamma_1 u_1(x_1, y_1) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left[u_2(x_2, y_2) p_2(x_2, y_2) \times \exp \left[-\frac{ik}{R_2} (x_2^2 + y_2^2) \right] \right] \times \exp \left[i \frac{2\pi L}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right] \right\} \quad (10)$$

$$\gamma_{12} u_2(x_2, y_2) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left[\gamma_1 u_1(x_1, y_1) p_1(x_1, y_1) \times \exp \left[-\frac{ik}{R_1} (x_1^2 + y_1^2) \right] \right] \times \exp \left[i \frac{2\pi L}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right] \right\} \quad (11)$$

式中， $\mathcal{F}\{\}$ 表示对大括号中的函数傅里叶变换， $\mathcal{F}^{-1}\{\}$ 表示对大括号中的函数傅里叶逆变换； f_x, f_y 为傅里叶变换频率值； L 为激光谐振腔长； λ 为激光波长， k 为波数； γ_1 为一复常数，表示从右向左单程传播后光场的相位延迟及振幅的衰减，复常数 γ_{12} 表示经过一个周期的往返传播后自在现光场的相位延迟及振幅的衰减。

根据(10)式、(11)式，可以按照 Fox-Li 提出的迭代法求解变反射输出镜谐振腔的光场分布。下面

分别介绍空腔近似情况下，高斯、超高斯输出镜谐振腔光场分布的三维数值解。

3.1 高斯输出镜谐振腔光场分布

根据 2.1 节应用几何光学计算的高斯输出镜谐振腔参数，代入(10)式、(11)式进行迭代求解。腔内全反射镜、输出镜反射的光场强度如图 2 所示，可以看出腔内光场强度呈现高斯分布，由全反镜反射的光场由于晶体棒的光阑作用，反射光场边缘被“切掉”，由高斯镜反射的光场束腰较小。激光输出

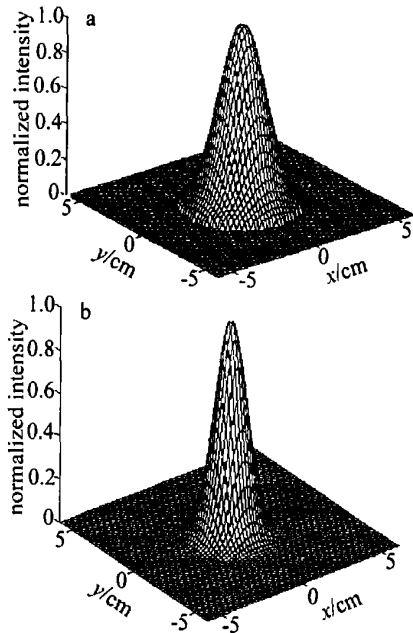


Fig.2 Optic field intensity in cavity
a—reflecting from total reflector b—reflecting from Gaussian mirror

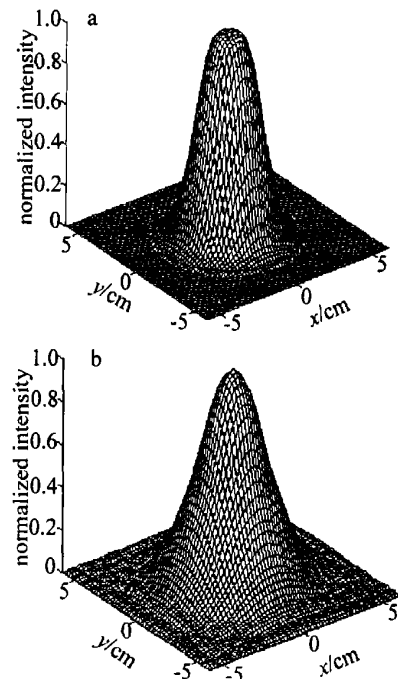


Fig.3 Output laser intensity distribution
a—near field b—far-field(5m from output mirror)

在近场、远场的光场强度分布如图3所示,可以看出近场输出激光强度呈现“平顶”分布,由于输出镜架的光阑作用,边缘也被“切掉”一部分,远场光强分布接近高斯分布,符合设计要求。

3.2 超高斯输出镜谐振腔光场分布

根据2.2节应用几何光学计算的超高斯输出镜谐振腔谐振腔参数,代入(10)式、(11)式进行迭代求解。腔内全反射镜、输出镜反射的光场强度如图4所示,可以看出腔内光场呈现中央“凹陷”的强度

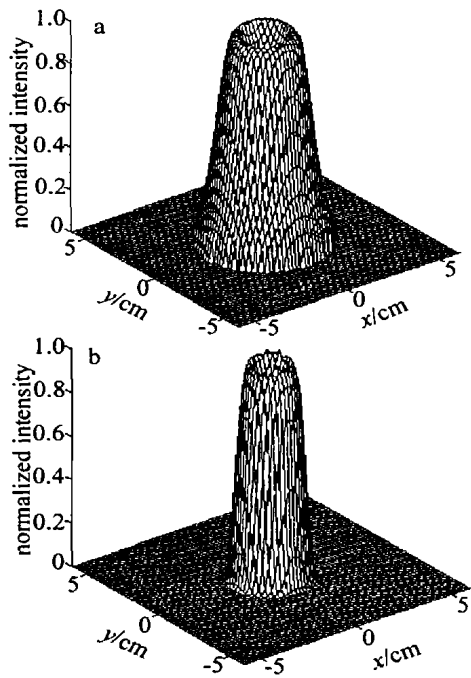


Fig. 4 Optic field intensity distribution

a—reflecting from total reflector b—reflecting from super-Gaussian mirror

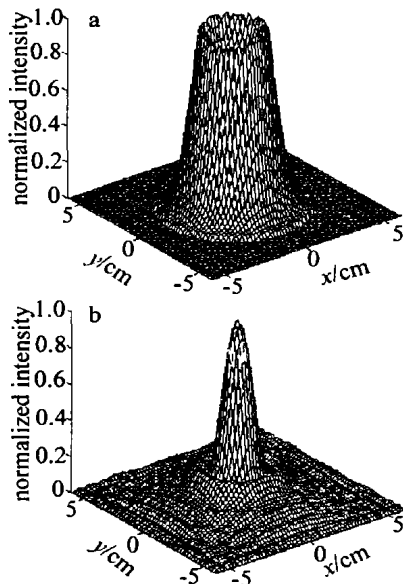


Fig. 5 Output laser intensity distribution

a—near field b—far-field(5m from output mirror)

分布,由全反镜反射的光场由于晶体棒的光阑作用,反射光场边缘被“切掉”,由超高斯镜反射的光场束腰较小,并且中央也呈现“凹陷”的强度分布。如果采用几何光学分析腔内光场分布,不会具有“凹陷”形状,其原因在于几何光学忽略了腔内光阑的衍射效应,因此,采用衍射光学方法分析更符合实际。激光输出在近场、远场的光场强度分布如图5所示,可以看出近场输出激光强度与几何光学分析结果近似,呈现“凹陷”的强度分布,由于输出镜架的光阑作用,边缘也被“切掉”一部分,远场中央光强分布接近高斯分布,边缘具有较弱的衍射环。对于超高斯输出镜的远场光强分布,采用衍射光学方法可以直观地分析激光的远场光强分布。

4 结论

在几何光学设计的变反射镜谐振腔基础上,应用衍射光学理论,通过快速傅里叶变换迭代求解的形式,数值模拟了高斯型、超高斯型变反射镜谐振腔的腔内、近场及远场的光场强度三维分布。几何光学具有简单方便等优点,广泛地应用于设计各种类型的激光谐振腔,但是几何光学往往忽略腔内增益介质、调制晶体、镜架等元件的衍射效应,与实际情况存在误差。而在衍射理论基础上的数值模拟虽然可以直观地模拟腔内外光场分布,但是计算量大,计算值不连续。因此,几何光学与衍射光学结合是设计变反射镜激光谐振腔的较好的方法,即应用几何光学方法设计谐振腔结构,应用衍射光学方法模拟腔内外光场分布,验证谐振腔设计的效果。

参考文献

- [1] 裴博,周寿恒,沈柯.变反射率非稳腔可调谐 TiAl_2O_3 激光器[J].光学学报,2001,21(7):804~807.
- [2] ARMANDILLO E, NORRIE C. Diode-pumped high-efficiency high-brightness Q-switched Nd:YAG slab laser [J]. Opt Lett, 1997, 22(15):1168~1170.
- [3] SILVESTRI S D, LAPORTA P, VALENTINI G. Comparative analysis of Nd:YAG unstable resonators with super-Gaussian variable reflectance mirrors [J]. Opt Commun, 1990, 77(2,3):179~184.
- [4] 常兵,蔡希洁,李庆国.变反射率镜非稳腔优化研究——超高斯途径[J].光学学报,1995,15(8):977~982.
- [5] 张放,张平雷,周寿恒.由变反射耦合输出的卡塞格林非稳腔激光技术研究[J].光学学报,1996,16(10):1400~1405.
- [6] PARENT A, MCCARTHY N, LAVIGNE P. Effects of hard apertures on mode properties of resonators with Gaussian reflectivity mirrors [J]. IEEE J Q E, 1987, 23(2):222~228.
- [7] SILVESTRI S D, MAGNI V, SVELTO O. Lasers with super-Gaussian mirrors [J]. IEEE J Q E, 1990, 26(9):1500~1509.