

变反射率镜非稳腔优化研究——超高斯途径

常 兵 蔡希洁 李庆国

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 分析了超高斯变反射率镜非稳腔的腔模和输出特性。以最高输出光束亮度为目标就其腔参数进行了优化研究和设计。在 20 mm 口径钕玻璃激光介质上采用这种腔结构进行了实验研究, 获得了数十焦耳近衍射极限的高亮度激光输出。远场含总能量 80% 的发散全角为 0.192 mrad, 是衍射极限的 1.9 倍, 输出能量是腔内损耗相当的普通非稳腔的 92%。

关键词 超高斯变反射率镜非稳腔, 优化设计, 高亮度。

1 引 言

以反射率径向高斯分布的变反射率镜作为输出耦合器的非稳腔(简称为 GVUR 腔)对腔内光束有着很强的空间限模能力且实现极为方便, 因而得到了广泛的研究, 并正逐步应用到各种激光介质上以提取近衍射极限的高亮度激光束^[1~7]。然而由于此类非稳腔的本征模径向分布是高斯型的, 光束在激光介质中的填充因子较低, 此外, 为了抑制腔内介质硬边口径的衍射, 高斯光束的尺寸必须取得较小, 这样就进一步降低了激光介质的利用率, 影响激光能量的提取。已有的研究表明此类非稳腔的输出能量只有腔内损耗相当的普通非稳腔的 70% 左右^[8]。采用反射率径向一定阶数超高斯分布的变反射率镜作为非稳腔的输出耦合器(简称为 SVUR 腔), 只要对其腔参数进行适当的优化设计, 就可望有效地克服上述以高斯反射镜为输出耦合的非稳腔的不足, 从大口径、高效率的激光介质上提取出近衍射极限、高能量的高亮度激光束^[9, 10]。

本文采用几何光学近似分析了超高斯反射镜非稳腔的腔模和输出特性。定义了一个定量评价激光谐振腔提取高亮度激光束能力的因子。以该因子最大为目标对腔的参数进行了优化研究和设计, 在 20 mm 口径钕玻璃激光介质上实验研究了这种腔结构的输出特性, 并将所得结果与理论值以及腔内损耗相当的普通非稳腔(简称 PTUR 腔)和高斯反射镜非稳腔的理论和实验结果进行了比较。最后总结了以输出光束亮度最高为目标超高斯反射镜非稳腔腔参数最优化设计的几点主要考虑。

2 腔模和输出特性理论

这里所谓“超高斯”就是指输出变反射率镜的反射率径向分布是某一阶超高斯线型的,

即:

$$R(r) = R_0 \exp[-2(r/W_m)^n] \quad (1)$$

n 为超高斯函数的阶数, R_0 为中心最大反射率, W_m 为反射率分布曲线的半径($1/e^2$)。

几何光学近似下, 以变反射率镜内侧作为参照位置, 自恰条件要求光场满足下述本征方程:

$$\sigma_n U_n(r) = (1/M) \rho(r/M) U_n(r/M) \quad (2)$$

其中 M 为腔的几何放大倍数, $U_n(r)$ 为入射到变反射率镜上光波的场幅, σ_n 为相应的本征值

$$\rho(r/M) = [R(r/M)]^{1/2} \quad (3)$$

几何光学近似下, 存在位相和幅度偏差的非稳腔基模的场分布可由这些偏差的特定的级数连乘近似给出^[11], 因而方程(2)式的基模解可写成:

$$u_0(r) = A \prod_k \frac{\rho(r/M^k)}{\rho(0)} \quad (4)$$

(1)、(3)两式代入上式后, 其中的级数收敛于: $\exp[-(r/W_s)^n]$, 这样基本征横模在输出镜内侧的场幅径向分布为:

$$U_0(r) = A \exp[-(r/W_s)^n] \quad (5)$$

其中

$$W_s = W_m(M^n - 1)^{1/n} \quad (6)$$

输出变反射率镜的透过函数可表示为: $t(r) = \{1 - R_0 \exp[-2(r/W_m)^n]\}^{1/2}$ (7) 这样在只考虑基横模的情况下, (5)式和(7)式的乘积即为输出光束的近场径向幅度分布函数

$$U_{out}(r) = A \{1 - R_0 \exp[-2(r/W_m)^n]\}^{1/2} \exp[-(r/W_s)^n] \quad (8)$$

近场光强分布则为: $I_{out}(r) = A^2 \{1 - R_0 \exp[-2(r/W_m)^n]\} \exp[-2(r/W_s)^n]$ (9)

$R_0 M^n$ 的值大于 1 以后, (9) 式所表示的近场光强分布的中央将会出现一凹陷, 该值比 1 大得越多凹陷越深, 衍射理论计算的结果表明^[10]这一凹陷越深, 远场落到中央峰以外的能量越多, 方向性越差。 $R_0 M^n = 1$ 时近场强度径向分布刚好平顶, 因而称该等式为平顶条件, 在设计变反射率镜时应充分考虑这一条件, 不能使凹陷出现得太深, 以保证有足够好的光束质量。

取费涅耳数 $N \ll 1$, 将(8)式代入极坐标下圆口径限场时的费涅耳衍射积分, 经数值计算后就得到输出光束在远场的强度和相应能量角分布的理论结果。

3 光束的参数测定和质量评估

激光束的空间参数主要包括近场强度径向分布, 远场强度、能量的角分布以及光束的方向性等。测定这些参数的方法很多, 这里皆采用简单易行同时又能说明问题的办法进行测量。

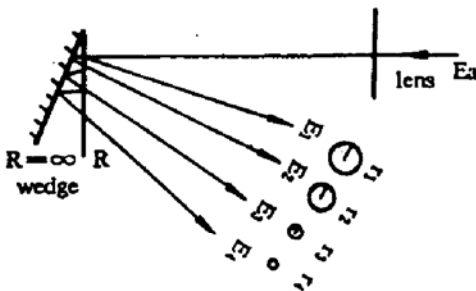


Fig. 1 The experimental arrangement for detecting the far-field energy angular distribution by optical wedge

用小孔取样扫描的方法测定近场强度分布曲线, 取样小孔作横向等间距平动, 步进为 1 mm, 用两个能量计分别记录小孔前后的激光能量, 它们的读数之比归一化后即可得近场光强的径向分布。用尖劈法来测定输出光束的远场特性, 实验的光路排布如图 1 所示, 尖劈由两块反射镜组成, 形成尖劈的后表面为全反射, 劈的前表面为部分反射, 反射率 $R = 0.6$, 输出

光束经由焦距为 1.4 m 的凸透镜聚焦, 再经空气尖劈反射后, 在远场黑相纸上得到一串半径递减、能量的空间分布函数相同且相互间强度之比已知 (决定于 R) 的烧蚀光斑串, 该光斑串经数据处理后即可给出光束的远场光强和能量角分布。为了纠正输出光场发散给聚焦带来的影响, 以最小光斑到透镜的距离作为实际焦长, $f = 2$ m。

为了定量评估激光谐振腔提取高亮度激光束能力的强弱, 定义一个亮度因子 E_0 , E_0 为从某一固定激光介质上, 采用相同的泵浦能量作用时, 使用某一特定的激光谐振腔在远场某一固定发散全角 $2\theta_0$ 内所能获得的激光能量值, 其中 θ_0 定义为一束近场口径与激光介质口径一样的理想平面波远场爱里斑中央亮斑的角半径, 即:

$$\theta_0 = 1.22\lambda/D \quad (10)$$

其中 D 为腔内激光介质的直径, λ 为激光波长。

以含总能量 80% 的远场全角 α 值作为输出激光束的远场发散角以评价输出激光束的光束质量, 以 α 的实验结果与衍射理论计算值的比值作为实验所获得的衍射极限倍数。

4 腔参数设计和实验研究

在直径为 20 mm, 长为 500 mm 的钕玻璃激光介质上采用双灯泵浦, 平凸型非稳腔, 实验研究了超高斯反射镜非稳腔的输出特性, 实验装置如图 2 所示, 平面镜为超高斯变反射率镜。为了进行比较, 在同样的器件上, 实验研究了腔内损耗相当的普通平凸非稳腔 (输出平板镜的反射率径向一致, 简称为 PTUR 腔) 的输出特性。

激光谐振腔的模式鉴别能力正比于 M^2 值, 因而为了保证有足够好的限模能力, M 值不宜取得太小, 另一方面, M 值是决定腔损耗大小的一个主要因素, 考虑到激光介质的增益水平和腔长的合理性, 这里取 $M = 1.43$, 相应平凸腔的腔长 $L = 0.65$ m, 凸面镜的曲率半径 $R = 20$ m。普通平凸非稳腔也取相同的参数。

理论结果表明超高斯反射镜非稳腔基横模的径向分布为与超高斯变反射率镜的阶数相同的超高斯型。与高斯曲线相比, 超高斯曲线的顶要平坦得多, 两边下降沿陡, 底部伸出的尾巴低且短。

这样在相同的口径衍射影响下腔模的横向尺寸可大很多, 而且超高斯形状的光束对介质的填充程度要比高斯的高很多, 在光斑大小相同的情况下, TEM_{00} 高斯模只能填充 22% 的介质, 而 $n = 8$ 的超高斯模则可填充 80% 的激光介质。因而可以预见超高斯反射镜非稳腔的能量提取效率要比高斯反射镜非稳腔的高得多。

根据 Silvestri 等人的研究结果, 超高斯的阶数 n 值越大, 输出能量越高, 且在 $n = 10$ 处趋于饱和, 同时 n 值越大输出光束的方向性要变差^[10], 本文选 $n = 7$ 。 R_0 的选取必须在平顶条件 $R_0 M^2 = 1$ 和由激光原理决定的最佳透过率等于腔内损耗 (即 $T_{max} = \gamma = 1 - R_0/M^2$) 以使能量提取效率最大的要求两者之间进行必要的权衡, 为此测定了所用激光介质的最佳透过率 T_{max} , 结果 $T_{max} = 0.56$, R_0 的两个极端值分别为 0.17 和 0.89, 取一中间值 $R_0 = 0.45$ 。为了与超高

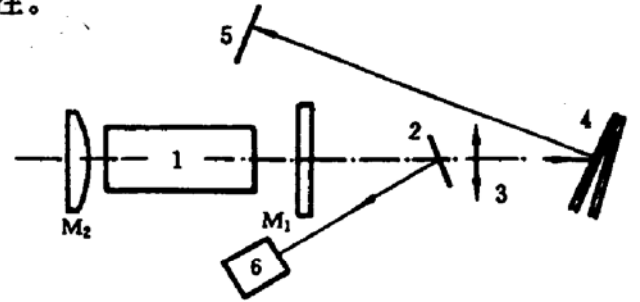


Fig. 2 The schematic experimental arrangement:

M_2 : convex mirror $R = 20$ m; M_1 : flat mirror; 1, Nd:glass ($\Phi 20 \times 500$ mm²); 2, beam splitter; 3, lens $f = 1.4$ m; 4, optical wedge; 5, record plate; 6, energy detector

斯反射镜非稳腔有差不多的腔内损耗，将普通非稳腔平板镜的反射率取为 0.5。尽量避免介质口径衍射的不良影响和提取尽可能高的能量是决定腔内本征光场的光斑尺寸 W_s 值的两大相互矛盾的主要因素， W_s 值越大，能量提取效率越高，介质口径衍射的影响越大，输出光束的方向性越差，因而必须选取一适中大小的 W_s 值。通常以介质口径边缘处光场的强度与中央最大光强的相对值 $\sigma_s = \exp[-2(10/W_s)^n]$ 作为该口径对光束带来的衍射影响的量度，理论计算的结果表明 $\sigma_s < 0.025\%$ 时输出光束的近场调制或远场亮度变化不大于 1%，本文取 $\sigma_s = 0.2\%$ ，这样 $W_s = 8.13 \text{ mm}$ ，由式(5)得 $W_m = 5.76 \text{ mm}$ 。图 3 是实验测定变反射率镜反射率径向分布的装置图，取样小孔的直径为 1 mm，变反射率镜横向平动，步径为 2 mm，用两个能量计分别记录小孔前和被测腔镜后的能量，测量前两卡计先进行标定，即在不放入待测镜时先测定两卡计读数的比值，这样由两卡计在放入被测镜时的读数就可求得变反射率镜不同位置的反射率值。使用该方

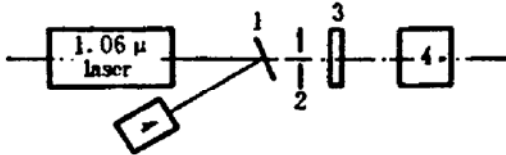


Fig. 3 The experimental arrangement for detecting the reflectivity of the VR mirror
1, beam splitter; 2, sampling aperture; 3, detected mirror moving radically; 4, energy detector

法测得的结果与设计值稍有不同， $R_0 = 0.48$ 。图 4 中 + 为实验测得的结果，实线为最佳拟合的超高斯函数曲线 $R(r) = R_0 \exp[-2(r/5.73)^7]$ ，即 $n = 7$ ， $W_m = 5.73 \text{ mm}$ ，相应的 $W_s = 8.1 \text{ mm}$ 。

由(9)式就可以得出此时输出光场的近场强度径向分布为：

$$I_{out}(r) = A^2 \{1 - 0.48 \exp[-2(r/5.73)^7]\} \exp[-2(r/8.1)^7] \quad (11)$$

相应的理论曲线和实验结果如图 5 所示，实验结果比理论值稍宽，中央有一微小凹陷，实验

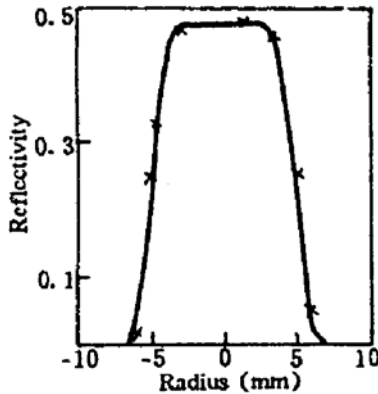


Fig. 4 Intensity reflectivity profiles of the mirror (cross +) used for the SGUR laser test, the line represents the best fit to Super-Gaussian function

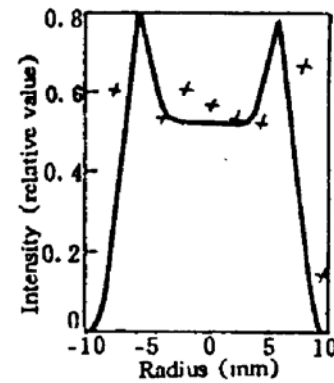


Fig. 5 The detected near-field intensity profile (cross +) of the SGUR laser. The line is the theoretical result

结果的凹陷中有一微小尖峰，这是由于激光介质存在缺陷所造成的，因为从近场烧蚀图可以清楚地看到一 W 型线状强区，且随着激光介质的转动这一强区的取向也随之作相应变化。远场能量角分布如图 6 所示，图 7 为输出能量与泵浦电压的关系曲线，图 6 和图 7 中的 (a)、(b) 分别为超高斯反射镜非稳腔和普通非稳腔的相应结果。由图 6 得超高斯反射镜非稳腔含总能量 80% 的远场理论发散全角 $\alpha_m = 0.1 \text{ mrad}$ ，普通非稳腔的远场发散角 $\alpha_m = 0.096 \text{ mrad}$ 。理论上超高斯反射镜非稳腔的方向性与普通非稳腔的差不多。

超高斯反射镜非稳腔和普通非稳腔远场发散全角的实验结果分别为 $\alpha_m = 0.192 \text{ mrad}$ ， $\alpha_m = 0.848 \text{ mrad}$ ，分别为理论值的 1.92 倍和 8.8 倍。在输出能量为 10 J 左右时采用同样的方

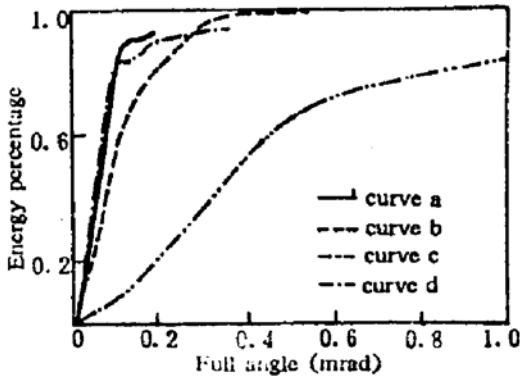


Fig. 6 The far-field energy angular distributions. Curve a, c are theoretical results of SGUR and PTUR respectively. Curve b, d are experimental results of SGUR and PTUR respectively

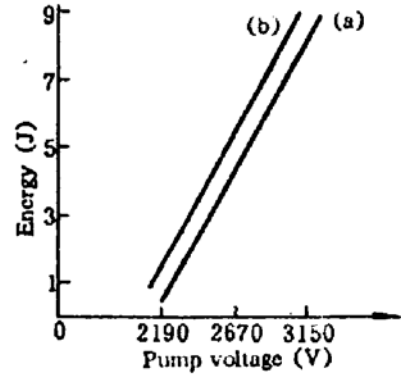


Fig. 7 The out-put energy versus the pumping volts: (a) SGUR laser; (b) PTUR laser

法测定了此时超高斯反射镜非稳腔输出激光束的远场发散角，结果发现 α_m 的值在实验误差范围内基本上没有改变，由此可见，超高斯反射镜非稳腔输出激光束的方向性并不因光泵的提高、输出能量的增加而明显变差。由图 7 可见超高斯反射镜非稳腔的阈值比普通非稳腔的略高，约高 150 V 左右，泵浦电压为 3150 V 时它们的输出能量分别为 $E_s = 9.32 \text{ J}$, $E_p = 10.1 \text{ J}$ 。因为激光介质棒的直径 $D = 20 \text{ mm}$ ，由(10)式得 $\theta_0 = 0.065 \text{ mrad}$ ，这样在该泵浦电压下超高斯反射镜非稳腔的亮度特性因子为 $E_{s,0} = 6.01$ ；普通非稳腔的亮度特性因子则为 $E_{p,0} = 0.96$ 两者之比为 6.31，即超高斯反射镜非稳腔的亮度要比 PTUR 腔的高 6.31 倍。

5 结束语

本文给出了几何光学近似下超高斯变反射率镜非稳腔的腔膜理论和输出特性理论。从实际应用的需要出发定义了一个表征激光谐振腔提取高亮度激光束能力强弱的亮度因子。应用理论结果，对超高斯变反射率镜非稳腔的腔参数进行了以输出光束亮度最高为目标的优化研究和设计，优化设计的主要考虑有以下几点：

- 1) 根据强空间限模能力和最佳能量提取的双重要求，选择一适当大小的腔几何放大率 M 值。
- 2) 为了保证有高的能量提取效率，同时输出光束又有好的光束质量，一般超高斯的阶数选在 5 到 10 之间。
- 3) 为了使腔内介质口径或其它硬边口径衍射对光束质量的不良影响不致于太大，同时又有高的能量提取效率，选择一适当大小的变反射率镜半径 W_m 值以保证在腔内最小硬边口径边缘处本征光场的强度值与其中心最大强度值的比值小于一定值，一般必须小于 2%。
- 4) 变反射率镜的中心透过率 R_0 值的选取，要在平顶条件和最佳透过率等于腔内损耗这两个要求之间作一权衡，取一最佳值，实验结果表明这一权衡可稍稍偏于最佳透过率的要求。

采用平凸非稳腔，在直径为 20 mm 的钕玻璃激光介质上实验研究了这种腔结构的输出特性，获得了数十焦耳的近衍射极限的高强激光输出。远场含总能量 80% 的发散全角为 0.192 mrad 是理论值的 1.9 倍，为腔内损耗相当的普通非稳腔的相应发散角的 22.5%，在相同泵浦电压作用下输出能量只比普通非稳腔小 7.7%，亮度因子则为普通非稳腔的 6 倍多。实

验结果表明这种超高斯变反射率镜非稳腔是一种很好的可获得高亮度激光输出的谐振腔结构。

参 考 文 献

- [1] 常 兵, 蔡希洁, 矩形截面高亮度激光腔研究现状. 国外激光, 1993, 20(7): 19~22
- [2] 韦 伟, 边少华, 孙忠琪, 由变反射率输出耦合镜构成的非稳腔 Nd:YAG 激光器的研究. 中国激光, 1992, 19(12): 886~890
- [3] N. McCarthy, P. Lavigne, Optical resonators with reflectivity mirrors; output beam characteristics. *Appl. Opt.*, 1984, 23(21): 3845~3850
- [4] P. Lavigne, N. McCarthy, J. G. Demers, Design and characterization of complementary Gaussian reflectivity mirrors. *Appl. Opt.*, 1985, 24(16): 2581~2586
- [5] D. M. Walsh, L. V. Knight, Transverse modes of a laser resonator with Gaussian mirrors. *Appl. Opt.*, 1986, 25(17): 2947~2954
- [6] A. Parent, N. McCarthy, P. Lavigne, Effects of hard apertures on mode properties of resonators with Gaussian reflectivity mirrors. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, QE-23(2): 222~228
- [7] A. E. Siegman, *Lasers*, Oxford, Oxford University Press, 1986: 913~922
- [8] 常 兵, 蔡希洁, 李庆国, 变反射率镜非稳腔 $\Phi 20$ mm 口径 Nd:glass 激光器研究. 中国激光, 1995, A22(5): 321~328
- [9] S. D. Silvestri, P. Laporta, V. Magni *et al.*, Solid-state laser unstable resonators with tapered reflectivity mirrors; the Super-Gaussian approach. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1988, QE-24(6): 1172~1177
- [10] S. D. Silvestri, V. Magni, O. Svelto *et al.*, Lasers with Super-Gaussian mirrors. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1990, QE-26(9): 1500~1509
- [11] Yu. A. Anan'ev, V. E. Sherstobitov, Influence of the edge effects on the properties of unstable resonators. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1971, 1(3): 263~267

Characterization of Unstable Resonator Using Variable Reflectivity Mirror

Chang Bing Cai Xijie Li Qingguo

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 6 July 1994; revised 24 August 1994)

Abstract The characterization of unstable resonator using Super-Gaussian mirror is analysed theoretically. Its cavity parameters have been designed for getting optimum laser brightness and its output characterization has been investigated experimentally at $\Phi 20$ mm Nd:glass laser. The output beam has near diffraction limited divergence of 0.192 mrad (full angle) and has output energy as high as 92% of that of the conventional unstable resonator.

Key words super-Gaussian variable reflectivity, unstable resonator, optical design, high brightness.