

变反射率镜非稳腔 $\phi 20$ mm 口径 Nd : glass 激光器研究

常 兵 蔡希洁 李庆国

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

摘要 详细分析了高斯变反射率镜非稳腔的腔模和输出特性, 给出了各阶横模的解析表达式。采用高质量的高斯变反射率镜在 $\phi 20$ mm 大口径 Nd : glass 激光介质上实验研究了这种腔的输出特性, 获得了 10 J 级发散全角为 0.18 mrad 近衍射极限的高强激光束, 该发散角只有相应普通非稳腔的 18%, 同样泵浦时输出能量约为普通非稳腔的 70%。最后实验研究了这种腔结构的失谐灵敏性。

关键词 变反射率镜非稳腔, 大口径, 高亮度

1 引 言

高能、强可聚性的激光光源(即高亮度的激光光源), 因其具有方向性好, 能量大, 易于产生高强度密度的激光光场而倍受众多实际应用的青睐。激光谐振腔除了具有提供光反馈和提取能量的功能外, 对腔内光束进行空间整形限模是其又一大基本功能, 如果某一种腔结构的这种能力越强, 那么从中输出光场的空间相干性就越好, 其可聚焦性也就越强。以变反射率镜作为输出镜的非稳腔(以下简称之为 VRMUR 腔)正是具有这种强限模能力的腔结构类型之一, 而且它的实现随着镀膜技术的高度发展和日趋成熟而变得极为方便, 在国外目前对这种腔结构的研究正成为该研究领域的热点之一^[1~6], 而国内当前这方面的研究才刚刚起步, 且大都是局限在小尺寸激光介质上, 输出能量较低^[7]。在大口径激光介质上使用这种腔结构显然是一种获取上述高能、方向性好亮度高激光输出的有效途径之一^[8]。

本文详细分析了高斯 VRMUR 腔的腔模和输出特性, 并给出了各阶横模的解析式。采用高质量变反射率镜在直径为 20 mm 的大口径钕玻璃激光介质上实验研究了高斯 VRMUR 腔的输出特性, 并将所得结果与理论计算结果以及腔功率损耗相当的普通非稳腔的实验结果进行了比较。最后实验研究了这两种腔的失谐灵敏性。

2 理论分析

2.1 高斯变反射率镜非稳腔的腔模理论

2.1.1 各阶本征横模的解析表达式

近轴近似波动方程给出^[3] VRMUR 腔内沿正 z 轴方向传播的第 n, m 阶本征横模的解析表

达式为

$$U_{n,m}(x,y,z) = H_n\left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega}\right) H_m\left(\frac{\sqrt{2}y}{\omega}\right) \exp\left\{-i\left[P(z) + \frac{k}{2} \frac{x^2 + y^2}{q(z)} - (n+m)\eta(z)\right]\right\} \quad (1)$$

其中

$$P(z) = -i \ln(1 + z/q_0) \quad (2)$$

$$q(z) = q_0 + z; \quad 1/q(z) = 1/R(z) - 2i/[kW(z)^2] \quad (3)$$

$$\omega^2(z) = (q_0 + z)\{\omega_0^2/q_0 + [\omega_0^2/q_0^2 + 4i/(kq_0)]z\} \quad (4)$$

$$\eta(z) = (i/2) \ln\{k\omega_0^2(q_0 + z)/[q_0k\omega_0^2 + (k\omega_0^2 + 4iq_0)z]\} \quad (5)$$

ω_0, q_0 皆为 $z=0$ 时 $\omega(z)$ 和 $q(z)$ 的值, $H_n(\sqrt{2}x/\omega), H_m(\sqrt{2}y/\omega)$ 分别为 n, m 阶厄米多项式。 $R(z), W(z)$ 分别为光场波前的曲率半径和光斑大小, 皆为实数, k 为波数。由式(1)可以看出, 当 $n=m=0$ 时, 参量 $\omega(z)$ 的影响只是体现在系数因子上, 而不影响其径向分布的线形, 因而高斯型介质膜 VRMUR 腔的基横模就是普通高斯型的。

这种广义高斯光束传播时, 参量 $q(z)$ 仍然遵从普通高斯光束相应参量的传播规律, 即

$$q_{\text{out}} = (Aq_{\text{in}} + B)/(Cq_{\text{in}} + D) \quad (6)$$

由式(4)可得出参量 $\omega(z)$ 的传输规律为

$$\omega_{\text{out}}^2 = \alpha\omega_{\text{in}}^2 + \beta$$

其中

$$\alpha = [A + B/q_{\text{in}}]^2 \quad \beta = i4B(A + B/q_{\text{in}})/K \quad (7)$$

in 和 out 分别表示相应于入射和出射的参量, A, B, C, D 分别为光束在腔内传播一周的总光学矩阵的各矩阵元, 这时 VRM 镜的光学矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2i/(kW_{\text{in}}^2) & 1 \end{pmatrix}$$

如果 $W(z)$ 和 $\omega(z)$ 完全一样, 那么(1)式就是普通稳腔的本征腔模——厄米高斯函数, 然而这里 $W(z)$ 和 $\omega(z)$ 不可相等, 否则所得的解将不能满足 VRMUR 腔的自洽条件。以腔内某一位置作为参照面, 自洽条件要求光束在腔内振荡一定次数以后, 传输一周前后各光束参数在该位置处能保持不变, 假设 q_s, ω_s 分别为参数 $q(z), \omega(z)$ 的这一不变值, 这样下两式成立

$$1/q_s = (C + D/q_s)/(A + B/q_s), \quad \omega_s^2 = \alpha\omega_s^2 + \beta$$

求解这两式得

$$1/q_s = (D - A)/(2B) \pm (1/B) \sqrt{[(A + D)/2]^2 - 1} \quad (8)$$

$$\omega_s^2 = \beta/(1 - \alpha) \quad (9)$$

将(8), (9)两式代入(1)式, 只要知道 q_0, ω_0 就可得高斯型介质膜 VRMUR 腔满足自洽条件的各阶横模的解析表达式。

2.1.2 模损耗和模式鉴别能力

反射系数 $\gamma_{n,m}$ 定义为输出 VRM 腔镜内侧反射回腔内的光场功率与入射到其上面的光场功率之比, 由式(1)得

$$\gamma_{n,m} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| H_n\left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega_s}\right) H_m\left(\frac{\sqrt{2}y}{\omega_s}\right) \right|^2 \exp[-2(x^2 - y^2)/W_s'^2] dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| H_n\left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega_s}\right) H_m\left(\frac{\sqrt{2}y}{\omega_s}\right) \right|^2 \exp[-2(x^2 - y^2)/W_s^2] dx dy} \quad (10)$$

W_s , W_r 分别为反射前后光场光斑的尺寸, 它们满足关系式

$$\frac{1}{W_s^2} = \frac{1}{W_r^2} + \frac{1}{W_m^2} \quad (11)$$

W_m 为 VRM 镜反射率的口径大小 ($1/e^2$), 相应的损耗系数定义为 $A_{n,m} = 1 - \gamma_{n,m}$, $n = 0, 1$ 时, 由(1)式得 $\gamma_{0,0} = R_0^2 W_s^2 / W_m^2$, $\gamma_{0,1} = R_0^2 W_s^4 / W_m^4$, 腔的模式鉴别能力 D 定义为 $D = 1 - \gamma_{0,1} / \gamma_{0,0}$, $D = 1$ 时腔的模式鉴别能力最强, $D = 0$ 时最弱, 将上面两式代入上式, 有

$$D = 1 - W_s^2 / W_m^2 \quad (12)$$

2.2 输出光束特性的理论分析

由上一节的结果可知, 高斯 VRMUR 腔的基模是高斯型的, 入射到 VRM 镜内侧的光场 $U_i(r)$ 可表示成腰参数为 W_s 的高斯函数

$$U_i(r) = A e^{-\langle r/W_s \rangle^2} \quad (13)$$

其中

$$W_s = W_m \times (M^2 - 1)^{1/2} \quad (14)$$

VRM 镜的透过函数可表示为

$$t(r) = \sqrt{1 - R_0} e^{-2\langle r/W_m \rangle^2} \quad (15)$$

式(13)和(15)的乘积即为输出光束的近场幅度径向分布

$$U_{out}(r) = U_i(r) \times t(r) \quad (16)$$

相应的近场光强分布为

$$I_{out}(r) = A^2 [1 - R_0 e^{-2\langle r/W_m \rangle^2}] e^{-2\langle r/W_s \rangle^2} \quad (17)$$

$R_0 \times M^2$ 的值大于 1 以后, 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^[6]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。 $R_0 \times M^2 = 1$ 时近场强度径向分布刚好持平, 因而称该等式为平顶条件, VRM 镜设计的时候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。

对(16)式进行夫琅霍夫衍射积分且取费涅耳数 $N \ll 1$ 就可得到输出光束的远场场幅径向分布 $U_f(r)$, $N = a^2 / (z\lambda)$, z 为远场到近场的距离。令 $\theta = r/z = rN\lambda/a^2$, $x = r_0/a$, r 和 r_0 分别为远、近场平面内的横坐标, 在极坐标下, $U_f(r)$ 的积分表达式为^[2]

$$U_f(\theta) = 2\pi N e^{-i\pi(1/N)(a\theta/\lambda)^2} \int_0^1 x \sqrt{1 - R_0 e^{-2\langle xa/W_m \rangle^2}} e^{-\langle xa/W_s \rangle^2} e^{-i\pi N x^2} J_0[2\pi a\theta x/\lambda] dx \quad (18)$$

a 为腔内最小限场光阑的半径, J_0 为零阶贝塞耳函数。远场强度分布则为

$$I_{ff}(\theta) = |U_f(\theta)|^2 \quad (19)$$

由下面的这一积分式经数值积分就可求得远场落在某一发散角 α 内的能量值

$$E(\alpha) = \int_0^\alpha |U(\theta)|^2 \cdot \theta \cdot 2\pi \cdot d\theta \quad (20)$$

所得结果经归一化后即远场能量的角分布。

3 高斯 VRMUR 腔的实验研究

我们在直径为 20 mm, 长为 500 mm 的 Nd: glass 激光介质上采用平凸非稳腔, 研究了高斯 VRMUR 腔(以下简称为 GVUR 腔)的特性, 实验装置如图 1 所示, 平板镜为高斯 VRM 镜, VRM 镜由于是采用先镀增透膜然后再在其上镀变反射率介质膜的技术制备而成的, 因而其反

射率高斯线形底部的反射率很小,精密测量的结果表明那里的反射率只有 0.1%。为了便于比较,我们还实验研究了腔内损耗与 GVUR 腔相当的普通平凸非稳腔(以下简称 PTUR 腔)的输出特性。输出光束的近场用黑相纸烧蚀图记录光斑形状,采用小孔 取样扫描的方法测定强度径向分布,取样小孔作横向等间距移动,用两个能量计探测小孔前后的光能量,两读数之比归一化后即可得近场光强分布。输出光束的远场特性采用尖劈法测定,见图 1,用输出光束经焦距为 1.4 m 的透镜聚焦,再经空气劈反射后在黑相纸上形成的烧蚀点串表征其形状。由于所得光斑串中各光斑的能量空间分布相同且相互间强度比已知(决定于劈前后反射面的反射率 R),这样只要读出每个光斑的半径经数值计算后就得到被测光束的远场光强和能量径向分布。实验中使用的空气尖劈前表面的反射率 $R = 0.6$,后表面为全反,为了纠正输出光场发散给聚焦带来的影响,我们以最小光斑位置到透镜的距离作为实际焦长,取 $f = 2$ m。

由式(11), (12) 以及(14) 可求得 GVUR 腔的模式鉴别因子 $D = 1 - 1/M^2$,由此可见 M 值越小, D 值越小,腔的模式鉴别能力越差,因而为了保证有足够好的限模能力, M 值不宜取得太小。本文取 $M = 1.43$,相应平凸腔的腔长 $L = 0.65$ m,凸面镜的曲率半径 $R = 20$ m。

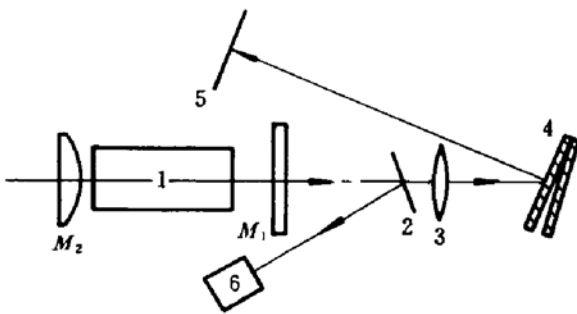


Fig. 1 Schematic of the experimental arrangement
 M_2 : convex mirror; $R = 20$ m; M_1 : flat mirror;
 1: Nd: glass ($\phi 20 \times 500$ mm); 2: beam splitter;
 3: lens, $f = 1.4$ m; 4: optical wedge; 5: record plate;
 6: energy detector

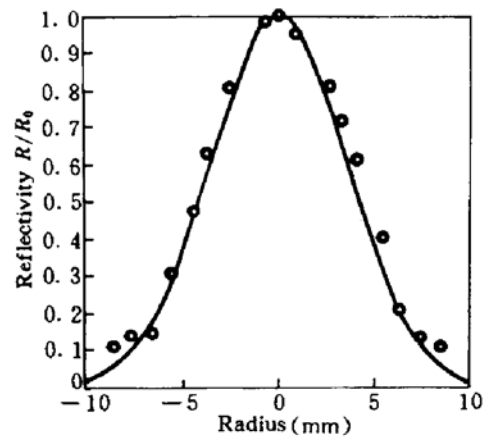


Fig. 2 Intensity and reflectivity profiles of the mirror (cross o) used for the GVUR laser test. The line represents the best fit to Gaussian function

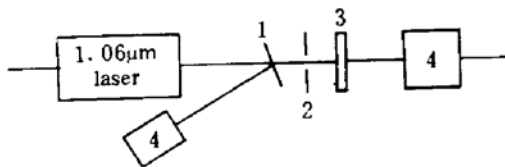


Fig. 3 The experimental arrangement for detecting the reflectivity of the VR mirror
 1: beam splitter; 2: sampling aperture;
 3: detected mirror radically movable;
 4: energy detector

VRM 镜的反射率为 $R(r) = R_0 e^{-2(r/W_m)^2}$,为了满足平顶条件,取 $R_0 = 1/M^2 = 0.49$ 。普通平凸非稳腔也取与 VRMUR 腔相同的参数,为了保持大致相同的腔内损耗,PTUR 腔平板输出镜的反射率取为 0.5。另外为了保证有较高的输出能量,同时棒口径衍射的影响又不至于太大,取 $W_m = 6.5$ mm。实际测得的结果与设计值稍有差别, R_0 , W_m 分别为 0.43 和 7 mm,相应的 $W_m = 7.16$,如图 2,图中实线为高斯曲线 $R(r) = 0.43 e^{-2(r/7)^2}$,“o”为实际测得的不同半径 r 值处的反射率值,图 3 是实验测定 VRM 镜反射率径向分布的装置图,取样小孔的直径为 1 mm,VRM 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 VRM 镜时测定两步计读数的比值,这样由两卡计在放入 VRM 镜

时的读数就可得出 VRM 镜的反射率分布。

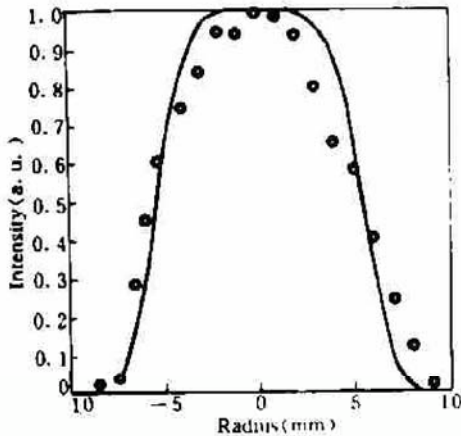


Fig. 4 The detected near-field intensity profile (cross o) of the GVUR laser. The line is the theoretical result

由式(17)可以得出此时近场输出光强的径向分布为

$$I_{\text{out}}(r) = A[1 - 0.43e^{-2(r/7)^2}]e^{-2(r/7.16)^2} \quad (21)$$

式(21)表示的强度-半径曲线示于图 4。小孔取样扫描法测得的结果示于图 4 中的“o”，由图可见实验结果与理论值符合得很好，图 5(a)，(b) 分别为 GVUR 腔和 PTUR 腔的输出光打黑相纸的近场光斑，GVUR 腔的略小于 PTUR 腔的，另外 GVUR 腔的光斑上有一些宽的平行调制条纹，这主要是输出平板自身的光学质量不太好造成的，因为实验中将该平板转一定角度后，平行条纹的取向也随之转动了相应的角度。

式(21)开方后代入衍射积分式(18)~(20)，

求数值积分后就得到 GVUR 腔的远场能量角分布的理论结果，结果示图 6(a)。图 6(b) 是近场直径为 20 mm 的理想平面波相应的远场能量径向分布。这里对理想平面波计算所得的结果与众所周知的爱里斑完全符合，从而说明所采用的计算方法是可靠的。由图 6(a)，(b) 得 GVUR 腔含总能量 80% 的远场发散全角 $\alpha_r = 0.096$ mrad，普通非稳腔的这一角度 $\alpha_r = 0.12$ mrad。由此可见，理论结果高斯 VRMUR 腔的就要比 PTUR 腔的好，其发散角只是 PTUR 腔的 74%。

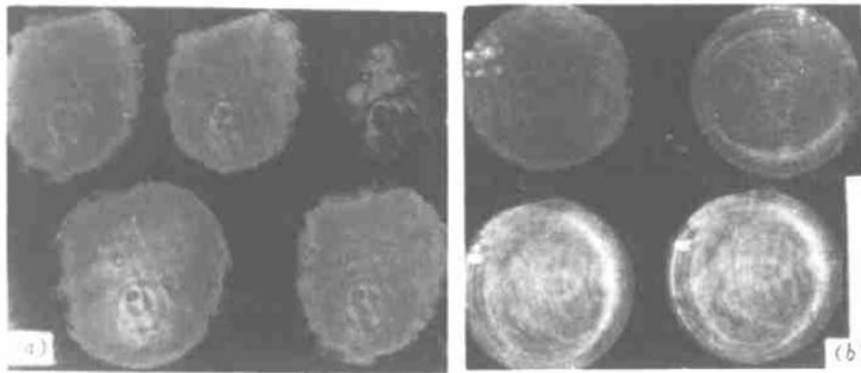


Fig. 5 The near-field beam spots of the GVUR (a) and PTUR (b) lasers

尖劈法得到的黑相纸烧蚀点示于图 7，数据处理后得到的远场能量角分布示于图 8，图 9 为输出能量与泵浦电压的关系曲线。图 7~图 9 中 (a)，(b) 分别为 GVUR 腔和 PTUR 腔的相应结果。图 7(a)，(b) 是在输出光束能量皆为 1.4 J 左右的情况下得出的，由图 7 可清楚地看出在远场 GVUR 腔的外围衍射环要远远少于 PTUR 腔的，由图 10 可得 GVUR 腔和 PTUR 腔远场含总能量 80%。发散全角的实验结果分别为 $\alpha_r = 0.18$ mrad， $\alpha_r = 0.98$ mrad，分别为理论值的 1.8 倍和 8.1 倍。由图 9 可见 GVUR 腔的阈值比 PTUR 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 $E_p = 7.2$ J， $E_p = 10.1$ J，可见 GVUR 腔的输出能量约为 PTUR 腔的 70%。

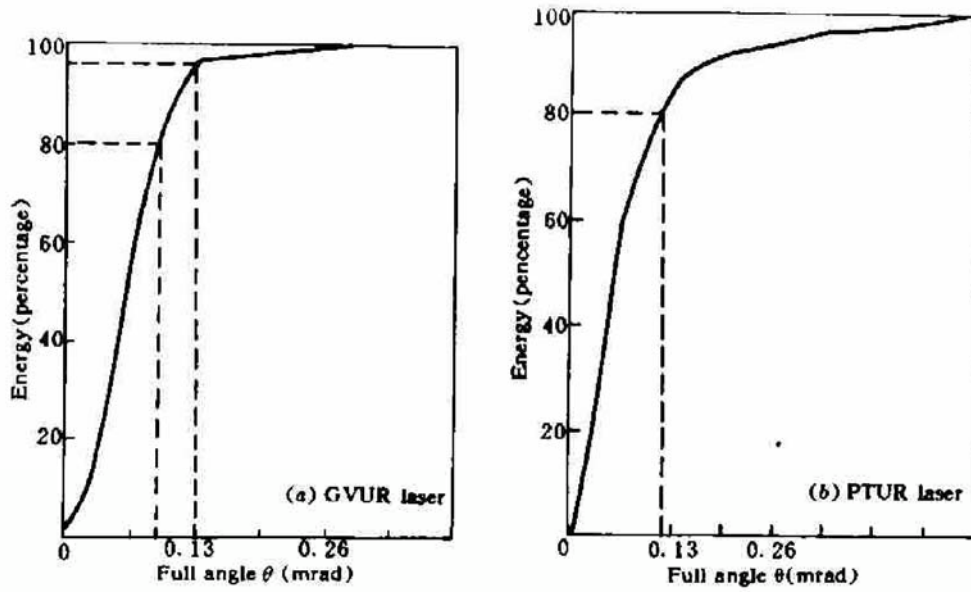


Fig. 6 The far-field energy angular distributions of the GVUR (a) and PTUR (b) lasers (theoretical results)



Fig. 7 The far-field beam spot bunches of the GVUR (a) and PTUR (b) lasers by wedge

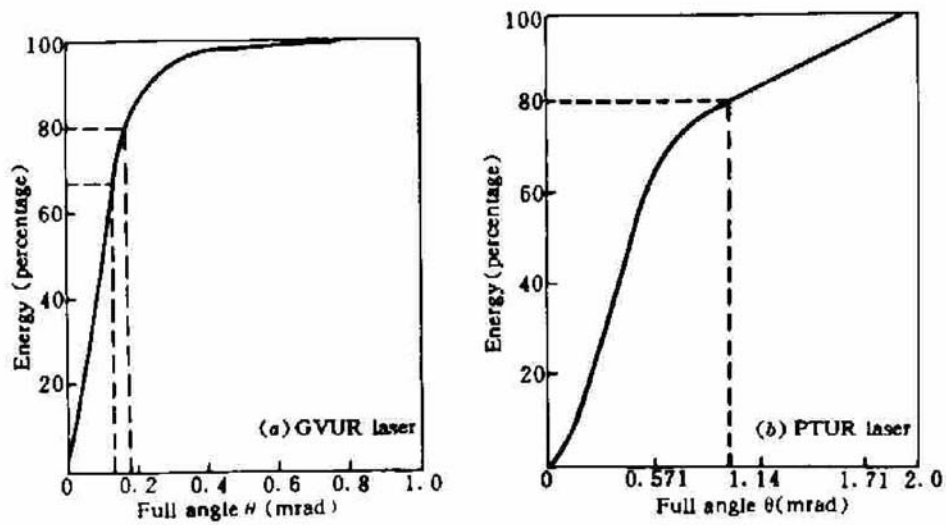


Fig. 8 The far-field energy angular distributions of the GVUR (a) and PTUR (b) lasers (experimental results)

4 失谐稳定性研究

为了研究 GVUR 腔的失谐稳定性,在保持泵浦电压不变的条件下,我们将谐振腔的输出平面镜调离准直状态,测定不同失谐量下的输出能量,结果发现 GVUR 腔在失谐量为 1.5 格时输出能量已只有准直时的 1/3,失谐量为 0.5 格时输出能量为准直时的 86%,而普通非稳腔则要到失谐量为 7 格时输出能量才降至准直时的 1/3,能量降至准直时的 86%的相应失谐量为 1.8 格,这里一格相当于腔镜转动了 $50''$,可见 GVUR 腔的失谐稳定性比普通非稳腔要差两倍多。尽管如此,从我们实验的情况看,实际使用还是能满足 GVUR 腔稳定性的要求,因为在我们简单的装置上,只是用磁心表座固定腔镜,虽然具体的寿命试验没有进行,但仍能保持整日实验不需重新调整。

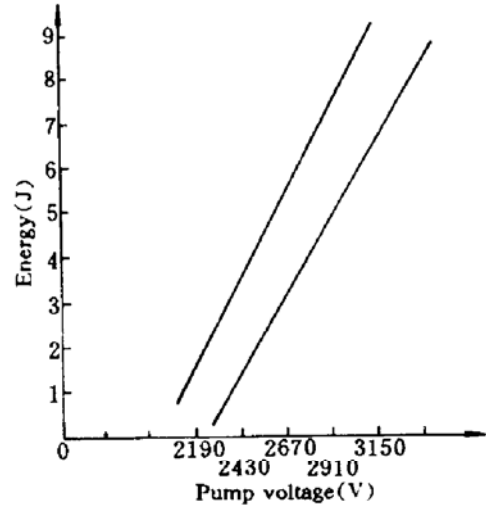


Fig. 9 The relations of output energy versus pumping volts of PTUR (a) and GVUR (b) lasers

5 结束语

本文给出了高斯变反射率镜非稳腔的腔模和输出光场的理论解析表达式。采用高质量的变反射率镜在直径为 20 mm 的大口径 Nd : glass 激光介质上研究了这种腔结构的输出特性,获得了近 10 J 近衍射极限的高强激光输出。远场含总能量 80% 的发散角为 0.18 mrad 是理论值的 1.8 倍,只有普通非稳腔相应结果的 18%,在相同泵浦电压作用下输出能量只比普通非稳腔小不到 30%。实验结果表明这种 VRMUR 腔是一种很好的可获得高亮度激光输出的谐振腔结构。

实验研究还发现变反射率镜非稳腔的失谐不灵敏性要差不少,但就实际应用而言并不算苛刻,另外输出镜的光学质量也是影响输出光束质量的一大因素。

参 考 文 献

- 1 P. Lavigne, N. McCarthy, J. G. Demers. Design and characterization of complementary Gaussian reflectivity mirrors. *Appl. Opt.*, 1985, 24 : 2581
- 2 A. E. Siegman. *Lasers*. Oxford: Oxford University Press, 1986. 905
- 3 D. M. Walsh, L. V. Knight. Transverse modes of a laser resonator with Gaussian mirrors. *Appl. Opt.*, 1986, 25 (17) : 2947
- 4 A. Parent, N. McCarthy, P. Lavigne. Effects of hard apertures on mode properties of resonators with Gaussian reflectivity mirrors. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1987, QE-23(2) : 222
- 5 K. J. Snell, G. Duplain, A. Parent et al.. Diffraction-limited Nd : glass and Alexande lasers using Graded Reflectivity Mirror Unstable Resonators. *SPIE*, 1991, 1410 : 99
- 6 S. D. Silvestri, V. Magni, O. Svelto et al.. Lasers with Super-Gaussian mirrors. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1990, QE-26(9) : 1500
- 7 韦 伟, 边少华, 孙忠琪. 由变反射率镜构成的非稳腔 Nd : YAG 激光器的研究. *中国激光*, 1992, 19 (12) : 886

8 常 兵, 蔡希洁. 矩形截面高亮度激光腔研究现状. 国外激光, 1993, (7): 19

A ϕ 20 mm Nd : glass Laser Using an Unstable Resonator with Gaussian Mirror

Chang Bing Cai Xijie Li Qingguo

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

Abstract The analytic results of TEM modes in an unstable resonator with Gaussian variable reflectivity mirror are given. The output characteristics of a ϕ 20 mm Nd : glass laser using a resonator of this kind are studied experimentally. The output beam has a near diffraction-limited divergence of 0.18 mrad and about 10 J energy. Its misalignment stability is studied, too.

Key words unstable resonator with Gaussian mirror, large-size, high brightness

国际会议征稿

由中国电子学会(CIE)、中国光学学会(COS)、国际光学工程学会(SPIE)、上海激光学会(SSL)联合发起的“国际光电子激光学术报告会”(ICOEL '95),定于1995年10月6~8日在杭州举行。会议主题包括光电子与激光的基础与应用研究的各个领域,同时还将举办一个国际性的光电子产品展示会。会议论文提要截止日期为1995年4月31日。

会议联系人: 杭州市杭州大学物理系 王绍民 林 强

邮 编: 310028

展示会联系人: 杭州市杭州大学物理系 陆璇辉

邮 编: 310028