

带变反射率耦合输出镜的连续高功率 Nd : YAG 激光器的研究

夏文建 李正佳 朱长虹 应花山 丘军林

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

提要 分析了具有变反射率耦合输出镜(VRM)的热透镜谐振腔的光束传输特征,研究了VRM的耦合输出及对高功率固体激光光束的选模作用,实验结果验证了理论分析并得到连续波180 W,光束参数乘积(远场发散角半角 \times 近场光束半径)为 $6.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的高亮度激光输出。

关键词 VRM, 连续高功率Nd : YAG 激光器

1 引言

采用多棒串接的高功率固体激光器的输出功率已达kW级,其光束参数乘积的典型值为 $40 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,其输出光束的发散角为 $30 \sim 50 \text{ mrad}$ ^[1,2]。市场上单棒系统(180~200 mm YAG晶体)的输出功率目前已高于500 W,但光束参数乘积为 $25 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,为耦合入 $\phi 600 \mu\text{m}$ 光纤的上限。这些激光器通常采用稳定多模谐振腔结构,激活介质的热效应导致高阶模的振荡,多模激光输出导致激光能量分布特性变差且聚焦困难,使得光束参数乘积变大。经光纤耦合输出后的光束质量主要由光纤芯径和数值孔径决定,小芯径的光纤要求光束参数乘积小。在许多应用领域,如切割、打孔等,优良的加工性能需要光束有良好的聚焦性能。因此,对于高功率YAG激光器要进一步提高其光束质量。

由于变反射率耦合输出镜可以改善具有非稳腔结构的激光器的输出光束中的近场纹波现象并且可降低远场的次级衍射峰^[3]。采用变反射率耦合输出镜的非稳腔结构(VRMUR)可使固体激光器在传统泵浦技术条件下输出高功率的接近衍射极限光束。对于具有高的小信号增益的脉冲固体激光器,通过仔细地设计谐振腔的结构参数,使谐振腔在整个输入功率范围内运行在非稳区,且非稳腔的放大倍数随屈光度的改变为有限的变化,采用正支非稳腔,棒成像非稳腔,近共心非稳腔等结构均已得到输出功率数百瓦,光束参数乘积为 $3 \sim 5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的脉冲激光输出^[4~6]。

非稳腔结构一般在小信号增益(g_{0l})大于2时才有效,而脉冲高功率固体激光器的小信号增益典型值为 $3 \sim 6$ 之间,通常脉冲高功率固体激光器谐振腔的放大倍数选择为 ≥ 2.0 左右。对于具有低的小信号增益的连续(CW)YAG激光器,为维持其激光振荡,降低振荡阈值,若采用VRMUR结构,谐振腔的放大倍数必须选得很低,即 M 接近于1,这将导致非稳腔的由放大

倍数决定的横模分辨率降低,采用非稳腔结构已失去其意义。由于 VRM 的反射率为特殊的空间分布,采用变反射率耦合输出镜可以增大基模体积,抑制高阶模式的振荡,可以采用带 VRM 的稳定谐振腔结构(VRMSR)来得到高功率且高光束质量的 CW YAG 激光输出。

对于含 VRM 的空腔理论已有精辟的阐述^[7~11],但对于高功率固体激光器,由于激活介质的热透镜效应,谐振腔的等价 G 参数将随激活介质的曲光度的改变而变化,导致光束参数、光腔特性也发生变化。本文在几何光学近似条件下,分析了带 VRM 的热透镜谐振腔的光束传输特征、损耗特性,分析了 VRM 的选模和耦合输出作用,实验结果验证了理论分析并得到高功率、高亮度的连续激光输出。

2 理论分析

高功率固体激光器中,激光棒由于泵浦光能量的吸收以及棒表面的冷却使棒中沿径向存在类似于抛物线的温度梯度与折射率梯度,使激光棒的作用等效于一个焦距为 f 的厚透镜。为分析问题方便,一般可将其等效为一个焦距为 f 的薄透镜。VRM 典型地采用高斯型 ($n = 2$) 或超高斯型 ($n > 2$),本文中分析 $n = 2$ 即高斯型情况。VRM 的能量反射率分布曲线由方程

$$R = R_0 \exp[-2(r/\omega_0)^2] \tag{1}$$

给出,式中 R_0 为中心反射率, ω_0 为 R 降至 R_0 的 $1/e^2$ 时对应的半径,简称高斯光斑半径。图 1 和图 2 为带 VRM 的热透镜谐振腔的矩阵原理示意图。图中, ρ_1, ρ_2 分别为镜 1 (均匀镜 URM)、镜 2 (变反射率镜 VRM) 的镜面曲率半径, f 为热透镜焦距, q_1, q_1' 为镜 1 上的入射光束和反射光束对应的光束参数, q_2, q_2' 为镜 2 上的入射光束和反射光束对应的光束参数, q 参数与光束参数(等相位面曲率半径 r , 高斯光束光斑半径 ω) 的关系为

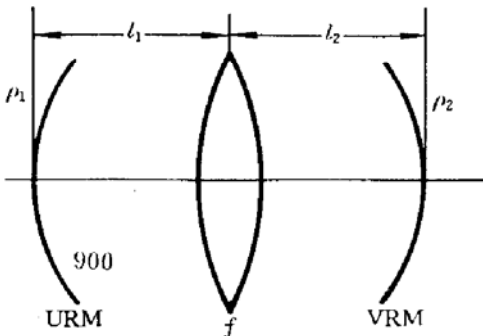


Fig. 1 Geometrical parameters of a thermal lensing resonator with VRM

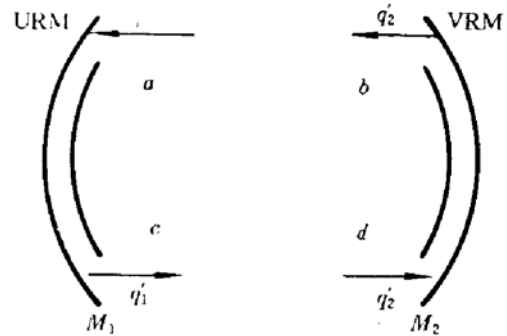


Fig. 2 Gaussian beam parameters and optical matrix

$$\frac{1}{q_i} = -\frac{1}{r_i} + i \frac{\lambda}{\pi \omega_i^2} \quad (i = 1, 2) \tag{2}$$

$$\frac{1}{q_i'} = -\frac{1}{r_i'} + i \frac{\lambda}{\pi \omega_i'^2} \quad (i = 1, 2) \tag{3}$$

$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ 为镜 1 (URM) 到镜 2 (VRM) 的传输矩阵, M_1 和 \bar{M}_2 分别为 URM 和 VRM 的反射矩阵, 且

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{\rho_1} & 1 \end{pmatrix}, \quad \bar{M}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{\rho_2} & 1 \end{pmatrix}$$

其中 $\frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{\rho_2} + i \frac{\lambda}{2\pi\omega_0^2}$, 由于 VRM 的反射矩阵元为复参量, 所以谐振腔的 G 参数亦有复参量:

$$G_1 = a - b/\rho_1 \quad (4)$$

$$\bar{G}_2 = d - \frac{b}{\rho_2} = d - \frac{b}{\rho_2} - i \frac{b\lambda}{\pi\omega_0^2} = G_2 - ih \quad (5)$$

以镜 1 为参考平面的光学往返传输矩阵 $\begin{pmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{pmatrix}$ 为

$$\begin{pmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} d & c \\ b & a \end{pmatrix} \bar{M}_2 \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2a\bar{G}_2 - 1 & 2b\bar{G}_2 \\ \frac{2}{b}(2aG_1\bar{G}_2 - G_1 - a^2\bar{G}_2) & 4G_1\bar{G}_2 - 2a\bar{G}_2 - 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由自再现条件得到

$$\frac{1}{q_1'} = \frac{\bar{D} - \bar{A}}{2\bar{B}} \pm \frac{\sqrt{(\bar{D} - \bar{A})^2 - 4}}{2\bar{B}} = -\frac{1}{\rho_1} \pm \frac{\sqrt{(2G_1\bar{G}_2 - 1)^2 - 1}}{2b\bar{G}_2} \quad (7)$$

同理

$$\frac{1}{q_2'} = -\frac{1}{\rho_2} \pm \frac{\sqrt{(2G_1\bar{G}_2 - 1)^2 - 1}}{2bG_1} \quad (8)$$

式中 b 为等效长度, $b = l_1 + l_2 - (l_1 l_2)/f$, 考虑到 M_1, M_2 矩阵对光束参数 q_1 和 q_1', q_2 和 q_2' 的变换作用, 则有

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{\sqrt{(2G_1\bar{G}_2 - 1)^2 - 1}}{2b\bar{G}_2} \quad (9)$$

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{\rho_2} \pm \frac{\sqrt{(2G_1\bar{G}_2 - 1)^2 - 1}}{2bG_1} \quad (10)$$

我们可以得到如下结论: $r_1 \neq r_1'$ 且 r_1 和 $r_1' \neq \rho_1, \omega_1 = \omega_1', r_2 \neq r_2'$ 且 r_2 和 $r_2' \neq \rho_2, \omega_2 > \omega_2'$, 即 URM 上入射光束和出射光束的等相位面半径不相同且均不等于 URM 的镜面曲率半径, 但镜面上的高斯光束半径相等, VRM 上入射光束和出射光束的等相位面半径不相同且亦不等于 VRM 的镜面曲率半径, 且镜面上的光束半径也不相等, 即 $\omega_2 > \omega_2'$, 结果导致在谐振腔的左右两部分在不同的传输方向上存在不同的束腰, 对应的腔内光束传播光路如图 3。

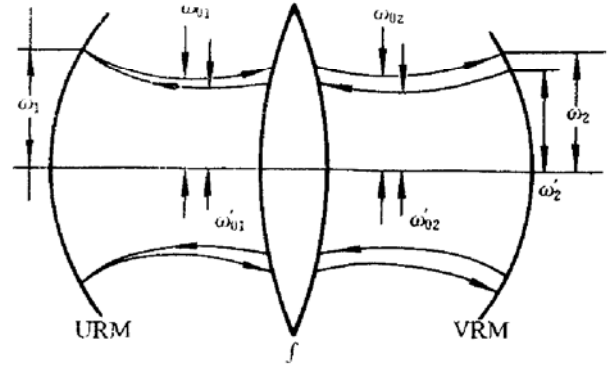


Fig. 3 Gaussian beam transmission profile inside the thermal lensing resonator with a VRM output coupler

经 VRM 耦合输出后的 TEM_{00} 模光场其近场强度分布为

$$I(r) = I_0 \exp\left[-2\left(\frac{r}{\omega_2}\right)^2\right] \left\{1 - R_0 \exp\left[-2\left(\frac{r}{\omega_0}\right)^2\right]\right\} \quad (11)$$

模的损耗为

$$L_{00} = \frac{I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \exp\left(-2\frac{r^2}{\omega_2^2}\right) \left[1 - R_0 \exp\left(-2\frac{r^2}{\omega_0^2}\right)\right] r dr d\theta}{I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \exp\left(-2\frac{r^2}{\omega_2^2}\right) r dr d\theta} = 1 - R_0 \left(\frac{\omega_2}{\omega_0}\right)^2 \quad (12)$$

同理 TEM_{01} 模的损耗为

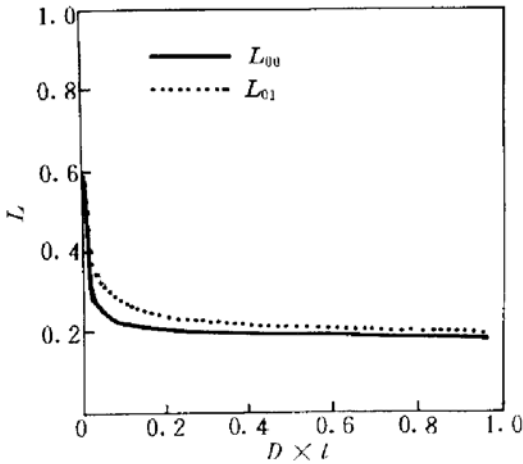
$$L_{01} = \frac{I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \cos^2\theta \exp\left(-2 \frac{r^2}{\omega_2^2}\right) \left[1 - R_0 \exp\left(-2 \frac{r^2}{\omega_0^2}\right)\right] r^3 dr d\theta}{I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \cos^2\theta \exp\left(-2 \frac{r^2}{\omega_2^2}\right) r^3 dr d\theta} = 1 - R_0 \left(\frac{\omega_2}{\omega_0}\right)^4 \quad (13)$$

从上式可知,由于变反射率输出镜的作用,使得 $\omega_2 > \omega_0$, 导致 TEM₀₀ 模和 TEM₀₁ 模的损耗是不一样的,模次越高,损耗越大,且随着曲光度而变化(见图 4)。相对于多模稳定谐振腔(VRMSR)而言,由于 VRM 抑制了高次模的振荡,使得在同等泵浦功率条件下,输出功率将有所下降,但是输出激光束的光束质量将变好。

3 实验结果与讨论

实验中我们采用两支氪弧灯(内径 $\phi 4 \times 100$ mm)在反射面镀金的聚光腔中进行连续泵浦,激光棒的尺寸为 $\phi 8 \times 110$ mm,激光器的几何结构参数为 $\rho_1 = \rho_2 = \infty, l_1 = l_2 = 250$ mm,如图 5 所示。输入功率在 0~10 kW 之间变化,测得的热透镜的热焦距在 $\infty \sim 30$ mm 之间变化,棒的热焦距随输入功率的关系如图 6 所示。谐振腔参数的选择保证谐振腔在整个输入功率范围内运行在稳定区 ($0 < g_1 g_2 < 1$), VRM 的参数为:中心反射率 $R_0 = 83\%, n = 2, \omega_0 = 2.4$ mm,其能量反射率的空间分布如图 7 所示。

Fig. 4 Transmission loss (L) of TEM₀₀ and TEM₀₁ modes as a function of diopters of the thermal lens ($D \times l$; refractive power times half of the resonator length)



选择保证谐振腔在整个输入功率范围内运行在稳定区 ($0 < g_1 g_2 < 1$), VRM 的参数为:中心反射率 $R_0 = 83\%, n = 2, \omega_0 = 2.4$ mm,其能量反射率的空间分布如图 7 所示。

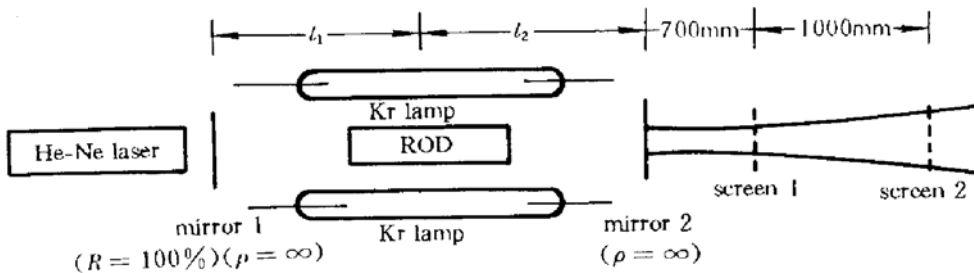


Fig. 5 Diagram of a laser with VRMSR

为与 URMSR 对比,我们在图 5 中的镜 2 位置替换 VRM 和 URM ($R = 80\%$),并在与镜 2 相距 700 mm 和 1700 mm 的位置分别确定激光束在空间中传输时对应的光束直径,从而计算出激光束的近场光斑直径和远场发散角以及光束参数乘积。实验测得在相同输入功率条件下,VRMSR 和 URMSR 所对应的输出功率如图 8 所示。图 9 给出了激光束在相同的输出功率条件下 VRMSR 和 URMSR 对应的激光束的光束参数乘积。

从图 4 和图 8 可以看出,采用 VRMSR 后,由于 VRM 对高阶模的透射损耗较大,且模次越高,损耗越大,从而使得在相同输入功率条件下,高次模对输出功率的贡献变小,因而总的输出功率将比 URMSR 要低。如图 8 所示,在输入功率为 10 kW 时,URMSR 对应的输出功率为

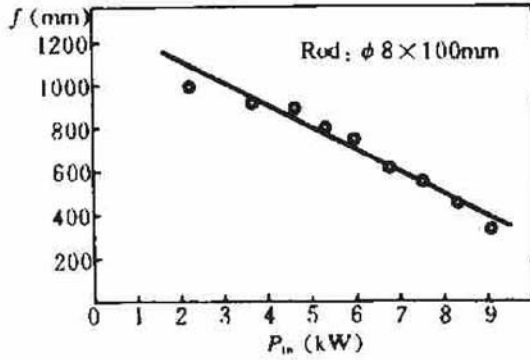


Fig. 6 Thermal focal length of a rod vs input power

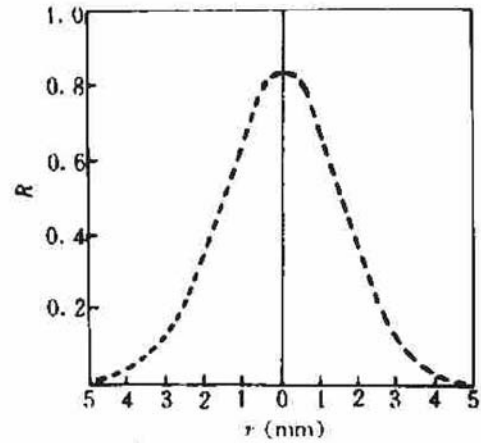


Fig. 7 Spatial energy reflectivity profile of VRM

350 W, 而 VRMSR 对应的输出功率为 180 W, 约为 URMSR 的 51%, 同时, 由于高次模振荡受到抑制, 导致低次模在激光束中的比例增加, 因而光束质量将变好(图 9), 在激光器的输出功率均为 180 W 的条件下, URMSR 所对应的光束参数乘积为 15.0 mm · mrad(输入功率为 6.7 kW), 而 VRMSR 所对应的光束参数乘积为 6.25 mm · mrad(输入功率为 10 kW), 图 10 给出了输出功率均为 180 W 时, 距离输出镜 700 mm 和 1700 mm 位置的 VRMSR 和 URMSR 所对应的光束直径。光束质量大大改善, 这将有利于使高功率固体激光束耦合入小芯径的光纤, 从而充分发挥固体激光器在柔性加工系统中的优势。

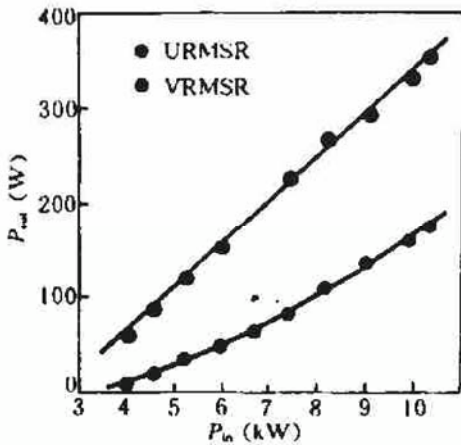


Fig. 8 Output power vs input power of VRMSR and URMSR

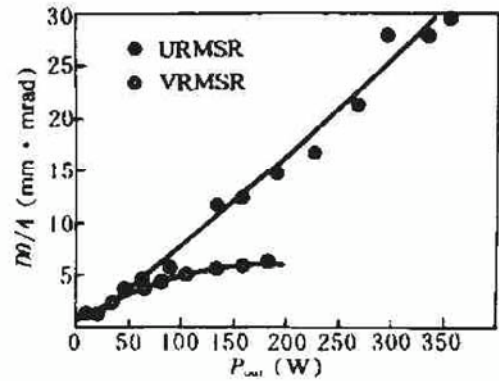


Fig. 9 Beam parameter products vs output power of VRMSR and URMSR

采用 VRMSR 后, 激光器的输出功率比 URMSR 下降较多, 原因在于: 1) 高次模的振荡受到了抑制; 2) 实验所采用的 VRMSR 尚未优化设计。图 9 中 VRMSR 所对应的曲线表明, 采用 VRMSR 后, 激光器的光束参数乘积随输出功率的增加呈缓慢上升的趋势, 原因在于随着输入功率的增加, 低次模和高次模的损失间隔逐渐变小(如图 4 所示), 同时, 激光器的热效应作用加剧也会使光束参数乘积变大。

为提高采用 VRMSR 的连续激光器的输出功率, 进

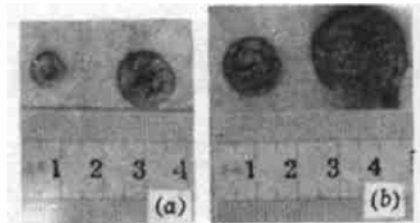


Fig. 10 Beam diameters of the laser with an output power of 180 W at the distances of 700 mm and 1700 mm from the output coupler for (a) VRMSR and (b) URMSR

一步改善光束质量,可采取以下措施:1)采用更长的激活介质(~ 150 mm)或多棒串接,提高激光器的单程增益;2)对VRM的参数及热透镜谐振腔进行优化设计,从而增加VRMSR的模式分辨率,增大有效模体积。

参 考 文 献

- 1 T. Yamada, S. Nishimura, S. Yoshida *et al.*. Multikilowatt continuously pumped Nd : YAG laser. Optical Society of America, Washington DC; Conference on Lasers and Electro-Optics Technical Digest Series 1988, 7 : 204
- 2 K. D. Hachfeld, J. Kantorsky, G. White. Industrial high-brightness laser. Optical Society of America, Washington DC; Conference on Lasers and Electro-Optics Technical Digest Series 1988, 7 : 204
- 3 A. E. Siegman. Lasers. Mill Valley, CA; University Science Books, 1986. 858~922
- 4 N. Hodgson, H. Weber. High power solid-state lasers with unstable resonators. *Opt. and Quant. Electr.*, 1990, 22 : S39~55
- 5 V. Magni, S. Desilvestri, Lie—Jia Qian *et al.*. Rod-imaging supergaussian unstable resonator for high power solid-state lasers. *Opt. Commun.*, 1992, 94(1,2,3) : 87~91
- 6 N. Hodgson, G. Bostanjoglo. The Near-Concentric unstable resonator (NCUR)-an improved resonator design for high power solidstate lasers. *Opt. Commun.*, 1993, 99(1,2) : 75~81
- 7 H. Zucker. Optical Resonators with Variable Reflectivity Mirrors. *Bell Syst. Tech. J.*, 1970, 49(9) : 2349~2376
- 8 A. Yariv, P. Yeh. Confinement and Stability in Optical Resonators Employing Mirrors with Gaussian Reflectivity Tapers. *Opt. Commun.*, 1975, 13(4) : 370~374
- 9 S. De Silvestri, V. Magni, O. Svelto *et al.*. Lasers with Super-Gaussian Mirrors. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1990, QE-26 : 1500
- 10 Lee W. Casperson, Susan D. Lunnam. Gaussian Modes in High Loss Laser Resonators. *Appl. Opt.*, 1975, 14(5) : 1193
- 11 Dwight M. Walsh, Larry V. Knight. Transverse Modes of a laser resonator with Gaussian mirrors. *Appl. Opt.*, 1986, 25(17) : 2947

Study on a Continuous Wave High Power Solid State Laser with a VRM Output Coupler

Xia Wenjian Li Zhengjia Zhu Changhong Ying Huashan Qiu Junlin
(Huazhong University of Sci. & Technology, National Laser Technology Lab., Wuhan 430074)

Abstract In this paper, the transmission characteristics of a Gaussian beam in a thermal lensing resonator with a VRM output coupler are analyzed. The output coupling and mode discrimination role of the VRM are studied. Experimental results accord with the theoretical analysis. From a high power continuous wave solid state laser with a VRM output coupler a laser beam with output power of 180 W and the beam parameter product of $6.25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ are obtained.

Key words VRM, CW high power laser