

# 由变反射率输出耦合镜构成的非稳定腔 Nd:YAG 激光器的研究

韦伟 边少华 孙忠琪

(北京光电技术研究所, 北京 100010)

**提要:** 研究了由变反射率输出耦合镜构成的非稳定腔 Nd:YAG 激光器的特点。给出了激光参量与变反射输出镜非稳定腔的关系。

**关键词:** 变反射率耦合镜, 非稳定谐振腔

## Unstable resonator Nd:YAG laser with variable reflectivity coupler

*Wei Wei, Bian Shaohua, Sun Zhongqi*

(Beijing Opto-Electronics Technology Institute, Beijing)

**Abstract:** An unstable resonator Nd:YAG laser with variable reflectivity coupler is developed. The relations between the laser characteristics and the unstable resonator parameters with a variable reflectivity coupler are described.

**Key words:** variable reflectivity coupler, unstable resonator

### 一、引言

通常非稳定腔采用衍射耦合输出, 其近场分布为面包圈形状, 远场分布为伴随一些傍带的爱里斑, 其中心强度仅为总强度的 86%<sup>[1,2]</sup>。这对许多应用如聚焦是不利的。采用变反射率输出耦合镜的非稳定腔恰能克服普通非稳定腔的缺点。虽然早已对由高斯反射镜构成的非稳定腔作了许多理论研究<sup>[3,4]</sup>, 但到八十年代末才研制出有实用价值的变反射率谐振腔镜并把它首次成功地用于 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[5]</sup>, 而后用于脉冲 Nd:YAG 激光器<sup>[6]</sup>。

本文利用  $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$  矩阵研究了由高斯反射镜组成的非稳定腔的本征函数( $q$  参数), 讨论变反射率镜的物理参数对激光器输出的影响。最后给出变反射率输出耦合镜非稳定腔 Nd:YAG 激光器的一些实验结果及结论。

## 二、由变反射率输出镜构成的非稳定腔的场分布

为了方便, 此处仅讨论反射率分布为高斯或准高斯形式的耦合镜:

$$R = R_0 \exp \left[ -2 \left( \frac{r}{w_m} \right)^n \right] \quad (1)$$

式中  $R_0$  为变反射率镜中心处 ( $r=0$ ) 的反射率,  $r$  为变反射率镜的径向坐标;  $w_m$  为反射率降到  $1/e^2$  时变反射率镜的半径 (称为反射镜的半径);  $n$  为准高斯阶次,  $n=2$  时,  $R$  为高斯分布,  $n \rightarrow \infty$  时,  $R$  为锐边均匀分布。

在准几何近似条件下, 腔内自治场在输出镜上的分布为<sup>[2]</sup>

$$\sigma u(r) = \frac{1}{M} \rho(r/M) u(r/M) \quad (2)$$

式中  $\sigma$  为本征值,  $M$  为非稳腔的几何放大倍数,

$$\rho(r) = \sqrt{R(r)}.$$

基模场分布

$$u_0(r) = A \exp \left[ - \left( \frac{r}{w_m} \right)^n \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{1}{M^n} \right)^k \right] \quad (3)$$

化简后为

$$u_0(r) = A \exp \left[ - \left( \frac{r}{w_i} \right)^n \right] \quad (4)$$

式中  $w_i = w_m (M^n - 1)^{1/n}$ , 它是腔内自治场在渐变输出镜上的尺寸, 即光斑大小。

输出激光的光强

$$I_0(r) = A' \exp \left[ -2 \left( \frac{r}{w_i} \right)^n \right] \left[ 1 - R_0 \exp \left( -2 \left( \frac{r}{w_m} \right)^n \right) \right] \quad (5)$$

分析  $I_0(r)$  得知, 当满足

$$R_0 M^n < 1 \quad (6)$$

时, 输出激光的近场分布不出现下陷。

当渐变反射镜的反射率为高斯函数时, 由此组成的非稳定腔内存在着高斯或准高斯自治场<sup>[2, 7]</sup>。这时可用  $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$  传输矩阵求出腔内任意处的  $q$  参数。入射到渐变镜  $M_1$  上的光束参数,

$$\frac{\lambda L}{\pi w_{1i}^2} = -H_1 + I_m \left[ \frac{1}{G_2} (\bar{G}_1 G_2 (\bar{G}_1 G_2 - 1))^{1/2} \right] \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho_{1i}} = \frac{1}{R_1} - \text{Re} \left[ \frac{1}{L G_2} (\bar{G}_1 G_2 (\bar{G}_1 G_2 - 1))^{1/2} \right] \quad (8)$$

式中  $H_1 = \lambda L / 2\pi w_m^2$ ,  $\bar{G} = G_1 - jH_1$ , 为谐振腔的复参数,  $G_1 = 1 - L/R_1$ ,  $G_2 = 1 - L/R_2$ ,  $R_1$  和  $R_2$  分别为渐变输出镜  $M_1$  及全反镜  $M_2$  的几何曲率半径,  $M_{1i}$  和  $\rho_{1i}$  分别为  $M_1$  镜 (GVRM) 处的光斑半径及波面曲率半径。

由 (7), (8) 两式可知, 输出光束的尺寸、曲率半径以及激活介质的利用率不仅与谐振腔的几何参数有关, 而且直接与渐变镜的物理参数有关。

### 三、实验与讨论

实验中所用非稳定谐振腔由凹面全反镜  $M_2$  ( $R_2=3139$ ), 输出渐变镜  $M_1$  ( $R_1=-1736$ ) 组成。调整腔长  $L$  使激光为准直输出。

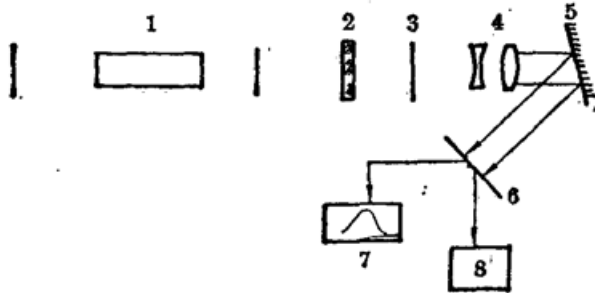


Fig. 1 Set-up for profile measurement of a variable reflectivity mirror

1—CW Nd:YAG laser; 2—attenuator; 3—rotation ground glass; 4—beam expander; 5—variable reflective mirror to be measured; 6—linear CCD array RL1024G; 7—oscilloscope; 8—computer

图中右侧的突起为参考反射面的 4% 基线。设计参数为  $n=2$ ,  $w_m=1.4$  mm,  $R_0=20\%$ 。除中心反射率外, 其余几个参数均与设计比较吻合。中心反射率比设计偏高的主要原因是参考面引入的误差。

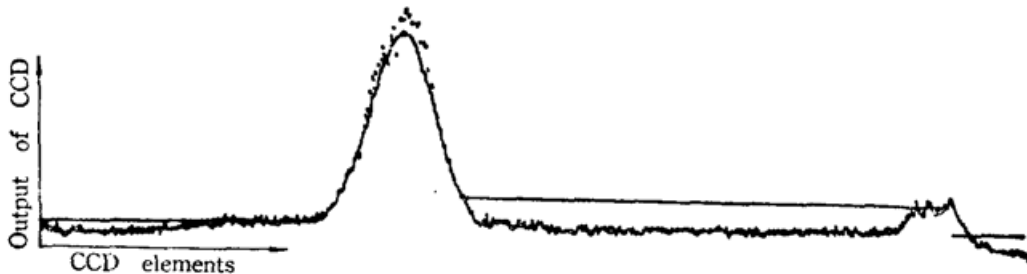


Fig. 2 Reflectivity distribution of a variable reflective mirror measured with RL1024 linear CCD array. Solid curve is the fitting curve. The results are:  $n=2$  (Gaussian profile);  $w_m$ , the radius of variable reflectivity mirror, is 1.65mm, the maximum reflectivity  $R_0=28.4\%$

图 3 是另一种渐变膜反射镜反射率的两维分布, 图 4 从四个方位观察反射率分布的对称性。

谐振腔为 Cassegrain 腔。腔长  $L=700$  mm, 谐振腔的放大倍数为  $1.8\times$ 。聚光腔为由超细粉末压制成的漫反射腔。渐变镜的中心反射率  $R_0\approx 28\%$ , 平均反射率  $\bar{R}=8.3\%$ 。采用双灯泵浦, 总输入 64J, 在重复频率为 1pps 时, 激光输出能量为 1.1J。用图 4 所示装置测量激光输出的近场分布, 其结果如图 5 所示。近场光斑如图 6 所示。从图 6 可以看到, 激光输出的近场分布没有下凹也不呈硬边耦合镜输出的面包圈形状。这与 (6) 式的理论分析完全一致。从输出光斑上可以看到一些互相叠加的衍射环, 这主要是由工作物质的孔径、渐变膜的半径  $w_m$  的衍射及透射效应所引起。为了消除这些衍射环, 必须使工作物质半径、渐变膜尺寸及谐振腔几何尺寸作到最佳匹配。

输出的远场分布示于图 7, 远场分布中不再有傍瓣。用 CCD 测量聚焦后的远场光斑半径并

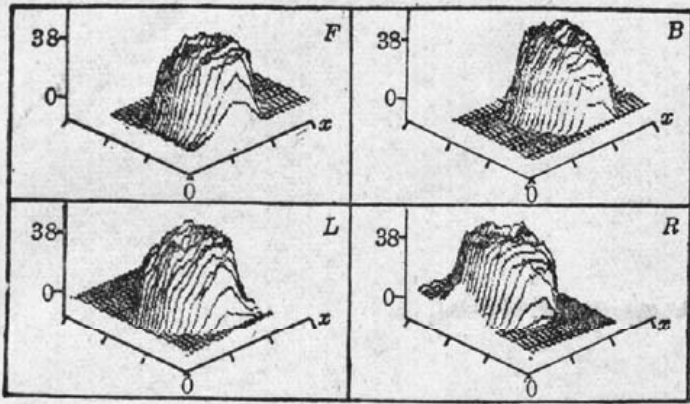


Fig. 3 Two dimensional profile of a variable reflectivity mirror observed from different directions to assure the reflectance symmetry

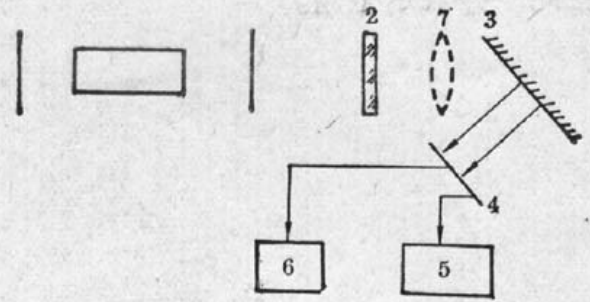


Fig. 4 Arrangement for measurement of near and far field profile of an unstable resonator Nd:YAG laser output with a variable reflectivity coupler  
 CCD array is placed at about 1m from the output coupler, and the near field profile is measured without focus lens 7

1—unstable resonator with a variable reflectivity coupler; 2—attenuator; 3—mirror; 4—CCD array, RL1024G; 5—computer, 6—oscilloscope; 7—focus lens ( $f=3.98\text{ M}$ )

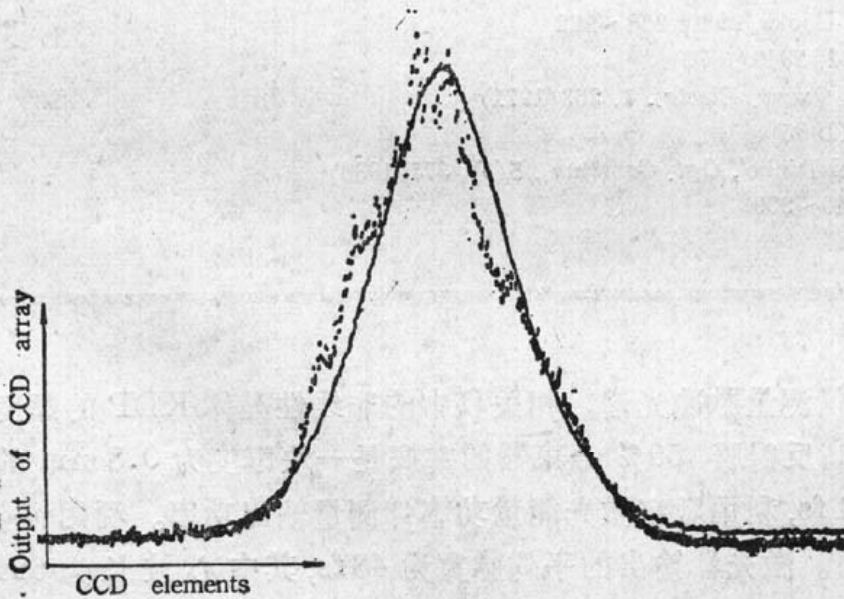


Fig. 5 The near field profile of unstable resonator Nd:YAG laser output with variable reflectivity coupler, measured with, RL1024G CCD array, diode center to center spacing;  $25.4\mu\text{m}$ , beam diameter, about  $7.4\text{mm}$  ( $1.1\text{m}$  from the coupler)

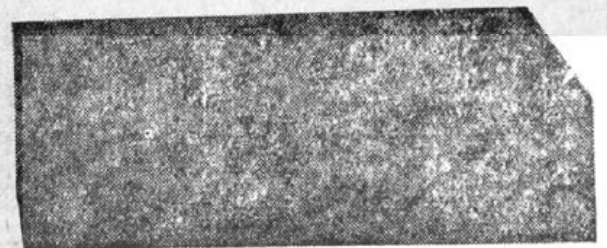


Fig. 6 Burned pattern of the output obtained at 30 cm from coupler

根据计算衍射角的方法<sup>[8]</sup>计算出该激光输出的远场发散度约为  $0.5\text{ mrad}$  (全角)。这与衍射极限值十分接近。

作者非常感谢张景华同志提供了 CCD 线阵测量装置, 王浩及史宏民同志提供了 CCD 空间分布测量仪。本实验中部分软件由阎欣同志协助编制, 陈义龙同志协助制作变反射率输出

镜,在此一并表示感谢。

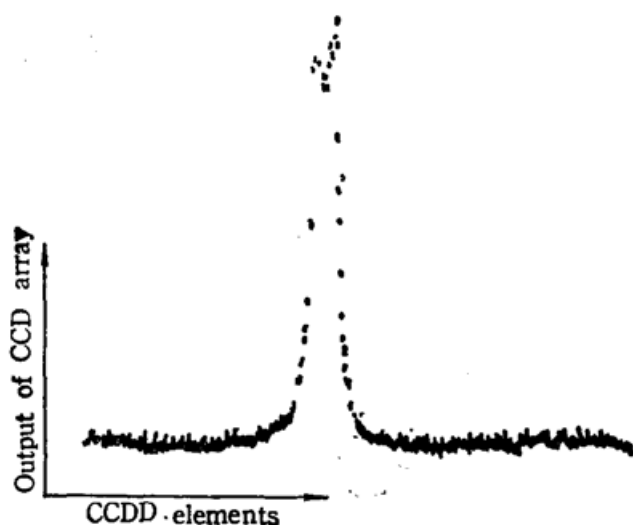


Fig. 7 Far field profile of the unstable resonator Nd:YAG laser with variable reflectivity coupler. The laser beam is focused by a lens ( $f=3.98\text{m}$ ), and measured by RL1024G CCD array

### 参 考 文 献

- 1 A. E. Siegman, H. Y. Miller, *Appl. Opt.*, **9**, 2729 (1970)
- 2 A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books, 1986, 858~922
- 3 H. Zucker, *The Bell System Tech. Journal*, **11**, 2349 (1970)
- 4 Y. A. Anan'ev, V. E. Sherstobitov, *Sov. J. Quant. Electr.*, **1**, 263 (1971)
- 5 C. Zizzo, C. Arnone, *Opt. Lett.*, **13**(5), 332 (1985)
- 6 Kevin S. Snell, Nathalie Mc Cathy, Michel Piche', *Opt. Commun.*, **5**(5), 377 (1988)
- 7 方洪烈, 光学谐振腔理论, 科学出版社, 1981, 240~259
- 8 Hecht Zajac, *Optics*, 1974, 329~392

(上接第 894 页)

利用单色仪及 OMA-II 光学多道分析仪测量脉冲光谱。相关仪中的非线性晶体 KDP 的厚度小于 0.2mm, 两臂全反射镜采用金属高反射膜, 50% 分束器的基底是一块厚度为 0.8mm 的石英片。强度自相关仪的测量精度约 1fs, 利用数字激光能量功率计测量输出功率。利用  $x-y$  记录仪得到的光脉冲相关曲线(见图 3)。激光器输出的平均脉宽为 43fs, 其中心波长为 624nm, 输出平均功率为 20mW, 脉宽不稳定性为  $\pm 3.3\%$ 。

利用高精度计数器测得频率的变化约 15Hz, 激光器输出重复频率 100MHz 的光脉冲, 故频率不稳定性小于  $10^{-6}$ 。实验结果与理论计算符合得很好。

作者衷心感谢史珂, 蔡金星等同志对本工作的具体帮助。

### 参 考 文 献

- 1 R. L. Fork, B. I. Greene *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **38**, 671 (1981)
- 2 J. A. Valdmanis, R. L. Fork *et al.*, *Opt. Lett.*, **10**, 131 (1985)
- 3 M. D. Dawson, T. F. Boggess *et al.*, *Ultrafast Phenomena V*, 5 (1986)
- 4 F. M. Mitschke, L. F. Moldenauer, *Ultrafast Phenomena V*, 58 (1986)
- 5 S. O. Wang, G. Chen *et al.*, *SPIE*, **1032**, 457 (1988)
- 6 王水才, 程 昭 *et al.*, *激光技术*, **13**(5), 1 (1989)
- 7 Shuical Wang, Ke Shi *et al.*, *SPIE*, **1155**, 511 (1989)