

# 由变反镜耦合输出的卡塞格林非稳腔 激光技术研究\*

张 放 张平雷 周寿桓

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要** 讨论了变反镜参数和由变反镜耦合输出的卡塞格林(Cassegrain)非稳腔参数的相互关系, 以及它们对激光光束特性的影响。在此理论基础上, 设计了 Nd·YAG Q 开关(电光调 Q) 高功率高光束质量的激光系统, 获得了脉冲能量为 1.4 J TEM<sub>00</sub> 模, 脉宽 10 ns, 重复频率 10 pps, 束散度达到衍射极限的 1.1 倍, 其倍频效率及混频效率分别为 60% 和 30%。

**关键词** 变反镜, 卡塞格林非稳腔, 光束质量。

## 1 引 言

小孔选模稳定腔是激光横模选择最基本、最普通的技术, 但它限制了增益介质的激活体积, 从而导致激光器的低效率。内插望远镜稳定腔的确可以获得较大的基模体积, 但由于腔内功率密度较高引起的破坏问题, 常常给激光器的工程应用带来困难。卡塞格林望远镜非稳腔是一种较为理想的基横模选择方案, 它能使单模运转体积充满整个介质, 并以平面波输出, 但由于硬边输出镜的衍射效应破坏了激光光束质量, 使得近场光斑为环形, 能量不均匀, 远场产生衍射环, 能量分布分散, 几乎只有 50% 的能量保留在中央分布区内, 使其在许多实际应用中受到限制。针对这一问题, 早在七十年代初期, 美国 Bell 系统技术期刊就发表了“变反镜谐振腔”的理论性文章, 提出了用变反镜谐振腔能解决由于硬边输出镜带来的衍射效应, 从而大大提高激光光束质量。这在激光加工、相干激光雷达、非线性光学、激光稳频技术等应用中有着重要的意义<sup>[1-4]</sup>。

本文主要讨论了变反镜谐振腔的设计理论与思想, 并介绍用此技术在 Nd·YAG 激光器中得到的结果, 为该技术今后的应用、发展奠定了基础。

## 2 镀膜实现变反镜的原理

所谓渐变反射率镜是指一种非均匀反射率镜, 其反射率与镜片的径向坐标满足一定的数学函数关系, 最常见有高斯曲线、准高斯曲线、抛物线等轴对称曲线函数。一般中心反射率较高, 沿径向方向递减。高斯变反镜的反射率可表示为

\* 国防预研基金资助项目。

收稿日期: 1995 年 10 月 21 日; 收到修改稿日期: 1996 年 2 月 8 日

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

式中  $R_{\max}$  为中心最大反射率,  $r$  是径向距离,  $w_m$  为高斯函数的“腰半径”,  $n$  为高斯函数的阶数。

自七十年代变反镜理论提出以来<sup>[2]</sup>, 由于工艺上的困难, 使其在工程应用中没有得到相应发展。直到八十年代末期, 随着镀膜技术在实现变反镜上的进展, 才使得这一理论在实际应用中有了显著的效果。

真空镀膜实现反射率径向渐变是一种非常简、精确的方法, 具有较好的工程应用价值。它是在基片的两个光学面上先镀上增透膜, 然后再在增透膜上镀上厚度为中心轴对称渐变分布介质膜, 如图 1 所示。根据介质膜多光束干涉理论, 当中心膜厚为  $(2n+1)\lambda/4$ ,  $n$  为整数, 此时中心反射率为最大值, 随着厚度从中心到边缘递减, 当正好在边缘衰减一个  $\lambda/4$  厚时, 边缘反射率为零<sup>[5]</sup>。在 Nd:YAG 脉冲激光器中, 用单层中心厚为  $\lambda/4$  的渐变膜就可以满足最佳反射率的要求, 但对于连续器件及一些增益较低的激光工作物质, 必须用多层膜来实现中心较高的反射率, 同时满足边缘反射率为零, 如图 2 所示, 其中偶数层的均匀膜都是  $\lambda/4$  厚<sup>[5, 6]</sup>。

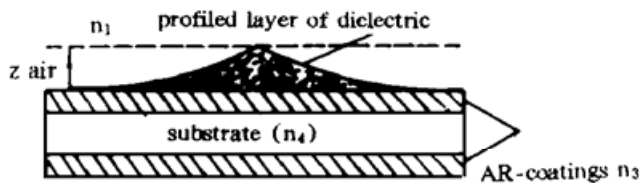


Fig. 1 Configuration of single layer VRM with  $\lambda/4$  thickness

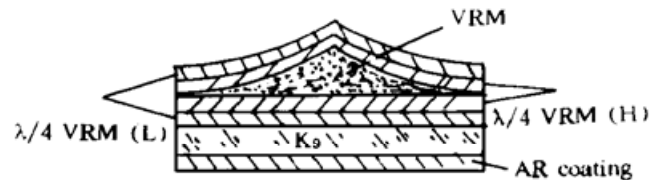


Fig. 2 Configuration of multilayer VRM with single  $\lambda/4$  profiled thickness

控制膜厚度分布, 可以得到不同的轴对称反射率渐变曲线。反射率曲线与薄膜厚度分布的关系为<sup>[6]</sup>:

$$E_r = \frac{\lambda_0}{4\pi n_2} \cos^{-1} \left| \frac{(1 - \mathcal{Y}_{12}^2)(1 - \mathcal{Y}_{eg}^2)}{2\mathcal{Y}_{12}\mathcal{Y}_{eg}(1 - R_r)} - \mathcal{Y}_{12}^2\mathcal{Y}_{eg}^2 - 1 \right| \quad (2)$$

式中,  $R_r$  为反射率,  $\lambda_0$  为激光波长,  $n_2$  为薄膜介质折射率,  $\mathcal{Y}_{12}$ 、 $\mathcal{Y}_{eg}$  分别为介质 1 与 2 之间和介质 2 与增透膜之间的幅值反射系数(见图 1)。

用这种变反镜替换目前几乎所有激光器的光学谐振腔都是方便可行的。由于它建立于标准薄膜光学基础上, 所以对于所有的波长都适用, 并具有较高的破坏阈值。目前, 作者用  $ZrO_2$  材料实现如图 1 所示的变反镜, 其损伤阈值大于  $700 \text{ MW/cm}^2$ , 并在长期工程应用中得到了验证。

### 3 变反镜卡塞格林非稳腔设计

用变反镜代替硬边输出镜所构成的卡塞格林非稳腔可消除由于硬边输出镜带来的衍射效应对光束质量的破坏, 使激光以较为理想的平面波输出。在理论上, 可以使近场光强分布绝对均匀, 远场分布更集中<sup>[2]</sup>, 如图 3 所示。

在变反镜卡塞格林非稳腔的设计中, 主要对非稳腔的横向放大率  $M$  与变反镜的参数( $R$ ,  $w_m$ ,  $n$ ) 进行分析, 它们与输出激光光束质量、效率都有直接的联系。

对于变反镜非稳腔, 在几何光学方面, 依然遵守传统卡塞格林非稳腔所有参数关系式<sup>[9]</sup>。

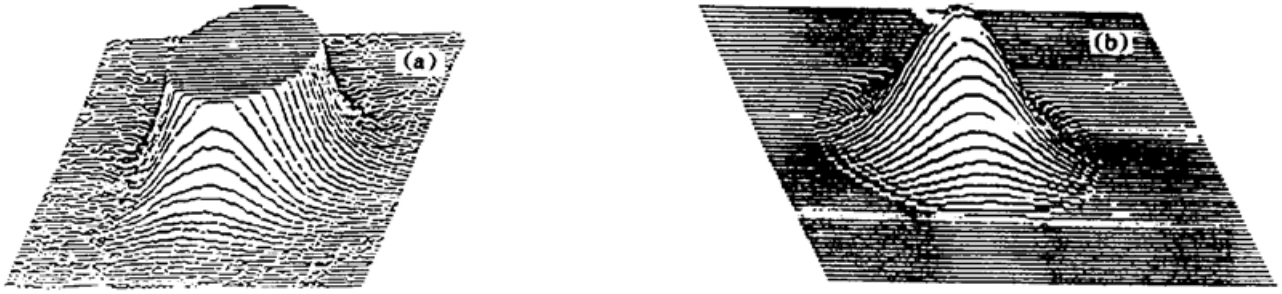


Fig. 3 The nearfield (a) and farfield (b) intensity distributions of VRM Cassegrain unstable resonator in theory

但变反镜非稳腔除了普通非稳腔的几何偏折损耗和衍射损耗外，还有输出镜不完全反射的输出损耗，其往返损耗率为<sup>[8, 9]</sup>：

$$\zeta = 1 - R/M^2 \tag{3}$$

$R$  为变反镜平均反射率

$$R = \left( \int_0^a R_r dr \right) / a \tag{4}$$

在同等条件下，变反镜非稳腔的放大率  $M$  应选择比硬边输出镜非稳腔最佳放大率  $M'$  小，才能满足此时的最佳耦合度条件，其关系为：

$$M^2 = M'^2 R \tag{5}$$

而且，对于变反镜卡塞格林非稳腔，激光介质横向直径  $D$  与输出镜的直径也不满足简单的  $M$  倍关系。如果要充分利用介质体积，而且使激光准直输出，那么腔内光束的光腰半径可表示为<sup>[6]</sup>：

$$w_b = (M^n - 1)^{1/n} w_m \tag{6}$$

其中， $M$  为腔放大率， $n$  和  $w_m$  为高斯曲线型变反镜的高斯阶数与“腰半径”从(3)式与(6)式不能完全求解  $M$ 、 $R_0$  及  $w_m$ 。为了使激光输出的近场光强分布均匀，再分析其光强近场分布表达式<sup>[6]</sup>：

$$I_n(r) = I_n(0) \exp\left(-\frac{r^2}{w_b^2}\right) (1 - R_r) \tag{7}$$

对式(7)求导，可得到：当  $R_0 M^n > 1$  时，近场强度分布中心出现凹陷，所以

$$R_0 = 1/M^n \tag{8}$$

为高斯变反镜谐振腔近场光强平顶分布的条件<sup>[4]</sup>，如图4所示。

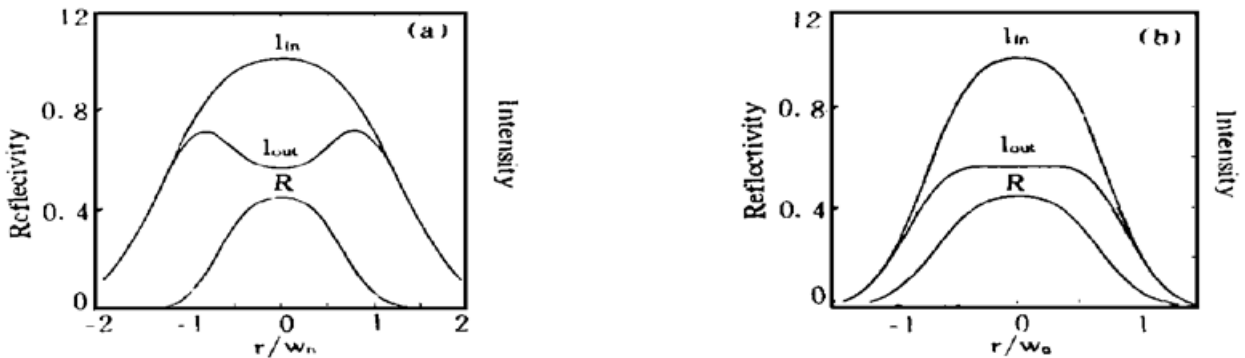


Fig. 4 (a) The intensity profiles of inner and outer cavity from  $n = 2.8$ ,  $R_0 > 1/M^n$  Gaussian mirror of  $M = 2$  Cassegrain unstable resonator, (b) The intensity profiles of inner and outer cavity from  $R_0 < 1/M^n$  Gaussian mirror of  $M = 1.6$  Cassegrain unstable resonator. The reflectivity profile of mirror  $R$  is also reported

所以,同时考虑(3)式,(6)式和(8)式,可以得到变反镜的参数和谐振腔的参数,使激光输出有最大的TEM<sub>00</sub>模体积,有较高的光束质量和激光效率。

作者重复了意大利科学家 Silvestri 的实验<sup>[7]</sup>,结果表明:在同一条件下,随着变反镜  $n$  参数值的增加,激光光强分布均匀性变差如图5、图6所示,而激光效率增加。似乎光束质量与转换效率之间相互矛盾,但从以上的理论分析和实验结果中,在  $n$  为较小值保证激光光束质量的同时,选择与其相适应的变反镜和谐振腔的其他参数,完全可以得到较高的效率输出<sup>[8]</sup>。

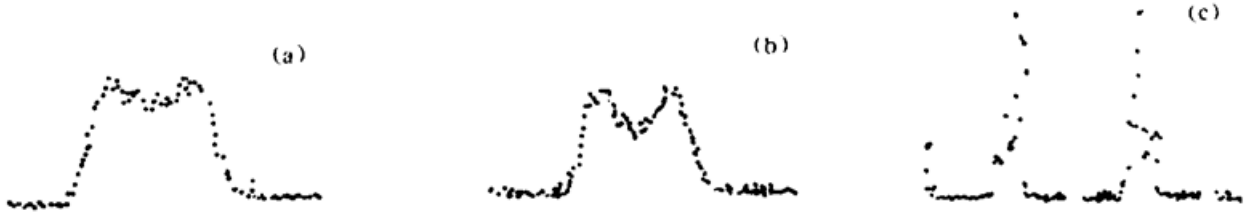


Fig. 5 The different nearfield intensity profiles from VRM Cassegrain unstable resonator with different  $n$  parameters. (a)  $n = 5$ , (b)  $n = 9$ , (C)  $n = \infty$

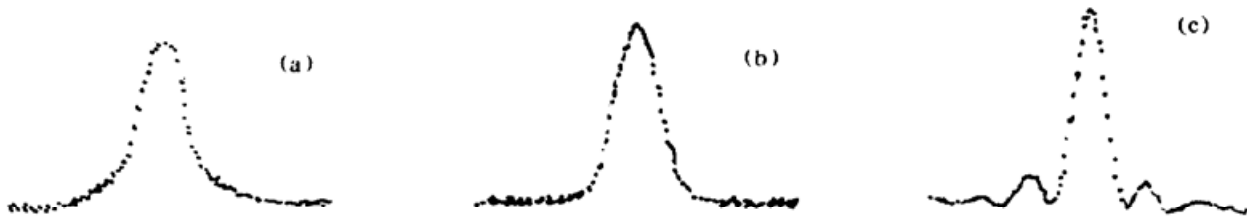


Fig. 6 The different farfield intensity profiles corresponding to the nearfield of Fig. 5

## 4 由变反镜输出 Nd·YAG 激光器设计与实验结果

### 4.1 设 计

根据 Nd·YAG 激光材料的增益与损耗,以及非稳腔菲涅耳数  $N_{eq}$  与衍射损耗的关系<sup>[9]</sup>,可以确定在最佳耦合度情况下, Nd·YAG 硬边输出镜卡塞格林非稳腔横向放大率  $M' = 3.5$ 。当选用二阶高斯反射率曲线( $n = 2$ ),可得:

$$R = \frac{R_0}{a} \int_0^a \exp \left[ - \frac{r^2}{w_m^2} \right] dr \quad (9)$$

$a$  为底半径,当  $w_m \approx a$ , 有泊松(Poisson)积分表达式<sup>[8]</sup>:

$$\int_0^\infty \exp(-\lambda x^2) dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\lambda}} \quad (10)$$

可以证明此时  $R$  近似等于  $\frac{\sqrt{\pi}}{2} R_0$ 。

当用单层  $N/4$  厚渐变膜,可得  $R_0 = 30\%$ , 从而得到  $R = 26.5\%$ 。由(5)式,得到变反镜卡塞格林非稳腔的横向放大率  $M = 1.8$ , 根据判别式(8),此时  $R_0 = 1/M^2$ , 所以,  $R_0$  与  $M$  的取值满足设计要求激光输出光强近场分布中心不会出现凹陷。对  $M = 1.8$  的卡塞格林非稳腔,其他腔参数  $R_1$ 、 $R_2$  及  $L$  的取值根据的非稳腔理论<sup>[9]</sup>,就比较简单了。当考虑 YAG 棒的热透镜效应( $f$ )时,全反镜的实际取值由下式确定<sup>[10]</sup>,

$$\frac{1}{R_1'} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{f} \quad (11)$$

至此，完成了所有变反镜参数和变反镜卡塞格林非稳腔参数的设计，如图 7、图 8 所示。

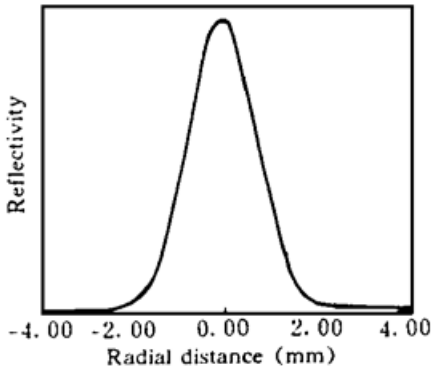


Fig. 7 Gaussian shape reflectivity profile.  $n = 2$ ,  $w_m = 2$  mm,  $R_0 = 30\%$

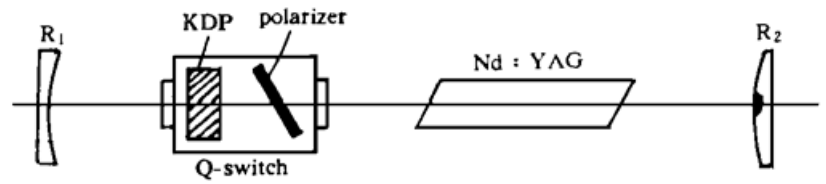


Fig. 8 Configuration of VRM Cassegrain unstable resonator with  $M = 1.8$ ,  $L = 600$  mm,  $R_1 = 4000$  mm,  $R_2 = 1500$  mm, Nd·YAG rod  $\phi 6 \times 80$  mm

### 4.2 实 验

本实验用  $ZrO_2$  材料、镀中心厚度为  $\lambda/4$  的渐变膜于双面已镀增透膜的  $K_9$  玻璃基质上，图 9 为单色仪测得的两片变反镜的反射率曲线。

按上一节变反镜卡塞格林非稳腔的设计方案，把变反镜用于 Nd·YAG 调 Q 激光器上取得了较好的效果。用  $\phi 6 \times 75$  mm 的 Nd·YAG 棒得到了大于 460 mJ 的 TEM<sub>00</sub> 模输出(KD\* P 电光调 Q，脉宽 10 ns) 重复频率为每秒 10 次，当加一级放大时(  $\phi 7 \times 75$  mm, Nd·YAG) 获得 1.4 J 的输出。与一般小孔选模稳定腔相比，其效率有明显的增加，与硬边输出镜卡塞格林非稳腔相比，其效率并不因为阶数  $n$  小而降低，如图 10 所示。所以，从实验中也证明了上一节的结论：为保证输出光束质量，当取高斯镜反射率曲线阶数  $n$  较小时，如适当设计其变反镜参数和腔参数，同样可以得到较高的效率。

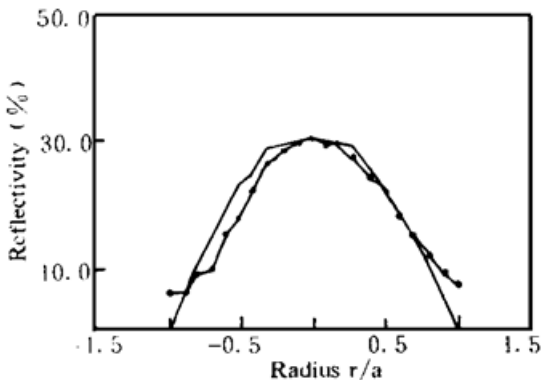


Fig. 9 Radial reflectivity profiles of the VRM output coupler  
••• Gaussian shape, — Parabolic shape

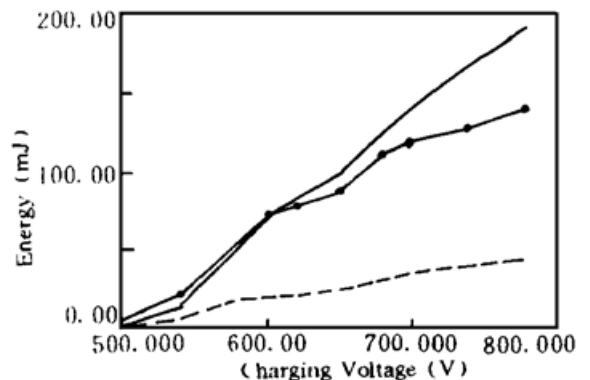


Fig. 10 Output energy as a function of charging voltage of the capacitor  
— VRM Cassegrain unstable, — Stable monomode, ••• Hardedge output mirror Cassegrain unstable

由于硬边输出镜的影响，使卡塞格林非稳腔激光器在近场和远场光强分布都不均匀，而变反镜可以克服这一缺点，使近场能量分布更均匀，远场分布更集中。图 11 是用 CCD 探测到由变反镜输出卡塞格林非稳腔 Nd·YAG 激光器实际输出激光的近场和远场光强分布，场分布是令人满意的。用小孔法测得光束发散角为 0.46 mrad，为衍射极限的 1.1 倍。

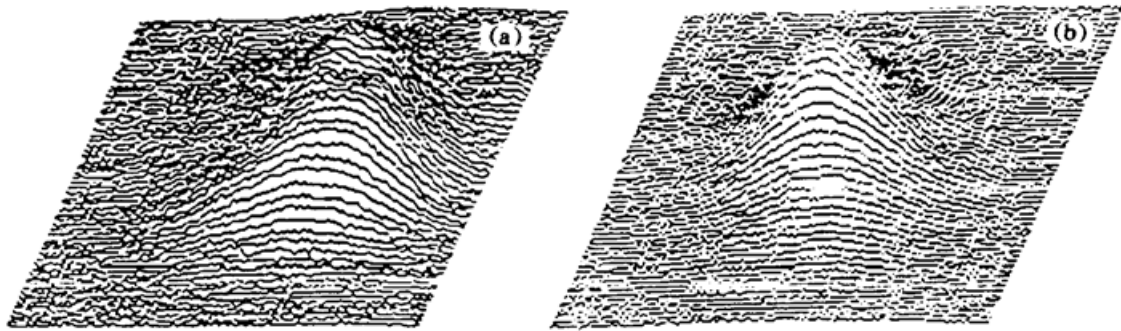


Fig. 11 (a) Near-field intensity distribution, (b) far-field intensity distribution detected by CCD

**总 结** 用变反镜输出的卡塞格林非稳腔, 通过优化设计可以使激光器以高效率、高功率、高光束质量输出, 特别是激光器工作在  $Q$  开关或锁模状态时, 均匀场分布能抑制晶体自聚焦产生的破坏。所以此技术会在激光应用上得到迅速的推广和发展。

作者已把此技术用在国防重点项目多波长 Nd·YAG 激光系统中, 使得倍频和混频转换效率达到 60% 和 30%。目前, 正把此技术用于钛宝石激光器的泵浦源 Nd·YAG 倍频激光系统中, 使钛宝石激光器有新的进展。

### 参 考 文 献

- [1] 周炳琨, 陈倜嵘, 激光原理. 北京, 国防工业出版社, 第一版 1984, 第五章
- [2] H. Zucker, Variable reflectivity mirror (VRM) resonator. *Bell Syst. Tech. J.*, 1970, (11): 2349~ 2376
- [3] Andre Parent, Effects of hard apertures on mode properties of resonators with gaussian reflectivity mirrors. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(2): 222~ 228
- [4] Zhang Fang, Nd·YAG Q-switched laser with VRM resonator. *Proc. SPIE*, 1992, **1979**: 269~ 271
- [5] Pierre lavigne, Design and characterization of complementary Gaussian reflectivity mirrors. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(16): 2581~ 2585
- [6] Pierre lavigne, Mode control in unstable Cassegrain resonator. *Proc. SPIE*, 1987, **783**: 69~ 76
- [7] S. De Silvestri, Comparative analysis of Nd·YAG unstable resonator with super-Gaussian VRM. *Opt. Commun.*, 1990, **77**(2): 179~ 184
- [8] 张 放, 由变反镜 (VRM) 输出高功率高光束质量 Nd·YAG 激光技术研究. 电子科技大学硕士论文, 1995
- [9] A. E. Siegman, Unstable optical resonator. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(2): 353~ 366
- [10] R. I. Herbst, A 200 mJ unstable resonator Nd·YAG Oscillator. *Opt. Commun.*, 1977, **21**(1): 5~ 7

## Cassegrain Unstable Resonator with Variable Reflectivity Mirror (VRM) Output Coupler

Zhang Fang    Zhang Pinglei    Zhou Shouhuan  
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015)

(Received 21 October 1995; revised 8 February 1996)

**Abstract** The interrelations between the parameters of VRM and Cassegrain unstable resonator and their effects on laser intensity distributions are studied in this paper. The experimental results of Nd·YAG laser using VRM output coupler are presented in detail. Up to 1.4 J TEM<sub>00</sub> mode output pulse (10 ns, 10 pps) with 1.1 diffraction limited divergence can be obtained by using VRM unstable resonator and one amplifier. The efficiency of SHG is 60% and THG is 30%.

**Key words** VRM, Cassegrain unstable resonator, beam quality.