

文章编号: 0258-7025(2001)03-0197-04

# 利用模清洁剂降低单频 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的强度噪声<sup>\*</sup>

陈艳丽 张靖 李永民 张宽收 谢常德 彭堃堃

(山西大学光电研究所, 量子光学教育部重点实验室 太原 030006)

**提要** 对全固化激光器输出激光的强度噪声谱进行了理论分析与实验测定, 设计了由三镜环行腔构成的模清洁剂, 利用它过滤高频噪声的特性使单频 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器的强度噪声降低, 通过模清洁剂之前激光在 30 MHz 才能达到散粒噪声极限, 通过模清洁剂之后在 7 MHz 处便达到散粒噪声基准。设计中兼顾了窄线宽与透过效率两方面要求, 模清洁剂的透过效率为 70%。

**关键词** 模清洁剂, 强度噪声, 散粒噪声基准

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Reduction of Intensity Noise of Single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> Laser Using Mode Cleaner

CHEN Yan-li ZHANG Jing LI Yong-min

ZHANG Kuan-shou XIE Chang-de PENG Kun-chi

(*Institute of Opto-electronics, Shanxi University, The Key Lab of Quantum Optics, Ministry of Education, Taiyuan 030006*)

**Abstract** The mode-cleaner consisting of a ring cavity with three mirrors was designed based on the theoretical analyses and experimental measurements to the intensity noise spectra of an all-solid-state laser. The intensity noise of a homemade single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser has been significantly decreased by using the mode-cleaner with the characteristic of filtering high frequency noise. The noise frequency to reach the shot-noise-limit has been reduced to 7 MHz from 30 MHz without the mode-cleaner. In design, the requirements of both narrow bandwidth and higher transitivity for the cavity were considered compatibly. The transitivity of mode-cleaner is 70%.

**Key words** mode cleaner, intensity noise, shot-noise limit

### 1 引言

LD 抽运的全固化单频激光器以其低的强度噪声特性广泛应用于高灵敏度干涉仪、高精度光谱、光通讯等领域。然而, 在真实的激光器中, 由于抽运光的强度噪声以及由输出耦合镜引入的真空起伏等的影响, 激光器输出激光的强度起伏在低频段远大于标准量子噪声极限<sup>[1]</sup>, 在几千赫到几兆赫之间存在弛豫振荡, 其强度噪声谱只有到了几十兆赫附近

才能达到散粒噪声极限。如果用此光源进行压缩态光场产生的实验, 由于经典噪声的存在将影响非经典光场的压缩度<sup>[2]</sup>。因此, 近年来人们采用注入锁定<sup>[3]</sup>、电光负反馈<sup>[4]</sup>等技术来抑制 LD 抽运单频激光器的经典噪声, 使之接近散粒噪声极限。最近, 美国斯坦福大学 Byer 小组利用 F-P 环行腔对 LD 抽运的 YAG 激光器噪声以及光束质量进行了改善<sup>[5]</sup>, 使激光器在 10 MHz 附近达到了散粒噪声基准。这种用来改善激光性能的无源腔被称为模清洁剂。虽然模清洁剂早已被用于改善光束横模质量, 但用于降低激光噪声却是近几年才开始的<sup>[5]</sup>。本文首先从理论上分析了模清洁器的噪声谱特性, 通过对模清洁剂参数的选择, 利用它过滤高频噪声的特性使单频

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(No. 19674034, No. 69837010)和山西省自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1999-11-22; 收到修改稿日期: 2000-01-25

Nd:YVO<sub>4</sub>激光器输出激光的强度噪声谱得到了改善。未加模清洁剂之前单频 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器输出激光的强度噪声在 30MHz 达到散粒噪声基准,通过模清洁剂后强度噪声在 7 MHz 附近便达到了散粒噪声极限,模清洁器的透过效率为 70%。

## 2 理论分析

由文献 [1] 可知,LD 抽运的全固化激光器输出激光的强度噪声谱可表示为各种噪声源影响的传递函数

$$V_f = \left\{ 1 + \frac{4k_m^2(\omega^2 + \gamma_l^2) - 8k_m k \gamma_l (r - 1) l}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_l^2} \right\} V_{\text{vac}} + \left\{ \frac{4kk_m \gamma_l^2 (r - 1)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_l^2} \right\} V_p + \left\{ \frac{4kk_m \gamma_l^2 (r - 1)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_l^2} \right\} V_{\text{spont}} + \left\{ \frac{4k_m k (\gamma_l^2 + \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_l^2} \right\} V_{\text{dipole}} + \left\{ \frac{4k_m k (\gamma_l^2 + \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_l^2} \right\} V_{\text{losses}} \quad (1)$$

其中,  $r = P_{\text{in}}/P_{\text{th}}$  为归一化抽运因子,  $L$  为激光谐振腔长,  $\omega_r$  为弛豫振荡频率,  $\omega$  为射频频率,  $\gamma_l$  为上能级自发辐射速率,  $k = (k_m + k_l)$  为总的腔衰减速率,  $k_m$  为由输出镜耦合损耗引起的衰减速率,  $k_l$  为由内腔损耗引起的衰减速率。注入噪声有来自输出耦合镜的真空噪声 ( $V_{\text{vac}}$ ), 抽运光的强度噪声 ( $V_p$ ), 自发辐射噪声 ( $V_{\text{spont}}$ ), 偶极起伏噪声 ( $V_{\text{dipole}}$ ) 以及内腔损耗引入的噪声 ( $V_{\text{losses}}$ )。一般而言, 除  $V_p$  外其他各种量子噪声源均处于量子噪声极限, 即  $V_{\text{vac}} = V_{\text{spont}} = V_{\text{dipole}} = V_{\text{losses}} = 1$ , 而抽运光噪声  $V_p$  则由抽运源激光二极管的强度噪声决定。

因此, 我们可以通过测量给定激光器的各参数 (表 1), 利用 (1) 式获得激光强度噪声谱的理论曲线。如图 3 所示, 全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出激光在低频段存在很高的弛豫振荡噪声, 且强度噪声尾延续到近 30 MHz 才达到散粒噪声极限。为了降低激光器的强度噪声, 使之在较低频率处达到散粒噪声极限, 我们采用模清洁剂来过滤高频段的强度噪声。

一个由三镜环行腔构成的模清洁剂如图 1 所示, 其运动方程可写为

$$\dot{a} = -ka + \sqrt{2k_{m1}}A_{\text{in}} + \sqrt{2k_{m2}}A_{\text{aux}} + \sqrt{2k_l}A_l \quad (2)$$

其中  $a$  为谐振腔腔模的湮灭算符,  $A_{\text{in}}$ ,  $A_{\text{out}}$ ,  $A_{\text{refl}}$  分别

指输入、输出和反射光场的算符,  $A_{\text{aux}}$  为由输出耦合镜引入的真空场算符,  $A_l$  指由内腔损耗而引入的真空场算符,  $A_{\text{rev}}$  指由腔外系统反馈的场算符,  $k_{m1}$ ,  $k_{m2}$  分别指由于输入耦合镜和输出耦合镜引起的衰减速率,  $k = k_{m1} + k_{m2} + k_l$  为总的衰减速率。

表 1 单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器参数表

Table 1 Parameters of single-frequency ring

Nd:YVO <sub>4</sub> laser		
Laser cavity length	$L_{\text{laser}}$	350 mm
Transmission of the output coupling mirror	$T_{\text{laser}}$	4%
Intracavity losses	$\delta_{\text{cav}}$	2%
Max. pump power	$P_{\text{max}}$	3.4 W
Decay rate of the output coupling mirror	$Q_m$	$1.71 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
Decay rate of the intracavity losses	$Q_l$	$8.55 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
Total cavity decay rate	$Q$	$2.56 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
Spontaneous emission from upper laser level	$\gamma_l$	$10^4 \text{ s}^{-1}$
Lasing threshold	$P_{\text{th}}$	300 mW

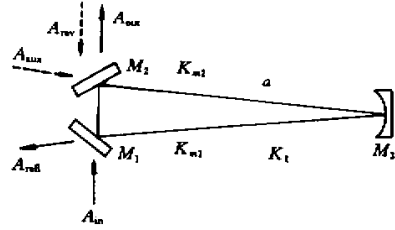


图 1 由三镜环行腔构成的模清洁剂

Fig. 1 Mode-cleaner consisting of a ring cavity with three mirrors

引入起伏算符  $\delta a = a + \alpha$ , 式 (2) 在稳态解附近作线性微扰处理, 得到正交振幅分量起伏

$$\delta \dot{X}_a = -k\delta X_a + \sqrt{2k_{m1}}\delta X_{A_{\text{in}}} + \sqrt{2k_{m2}}\delta X_{A_{\text{aux}}} + \sqrt{2k_l}\delta X_{A_l} \quad (3)$$

其中  $X_a = a + a^+$  是腔内光场的振幅算符。(3) 式经傅里叶变换为

$$\delta X(\omega)_a = \frac{\sqrt{2k_{m1}}\delta X(\omega)_{A_{\text{in}}} + \sqrt{2k_{m2}}\delta X(\omega)_{A_{\text{aux}}} + \sqrt{2k_l}\delta X(\omega)_{A_l}}{k - i\omega} \quad (4)$$

根据  $M_1$ ,  $M_2$  镜面上输入输出场之间的关系可得透射及反射场的边界条件为

$$\delta X(\omega)_{A_{\text{out}}} = \sqrt{2k_{m2}}\delta X(\omega)_a - \delta X(\omega)_{A_{\text{aux}}} \quad (5)$$

$$\delta X(\omega)_{A_{\text{refl}}} = \sqrt{2k_{m1}}\delta X(\omega)_a - \delta X(\omega)_{A_{\text{in}}} \quad (6)$$

将 (5) (6) 代入 (4) 式分别得到模清洁剂透射场及反

射场的振幅起伏

$$\delta X(\omega)_{A_{out}} = \frac{2\sqrt{k_{m1}k_{m2}}\delta X(\omega)_{A_{in}} + (2k_{m2} - k + i\omega)\delta X(\omega)_{A_{aux}} + 2\sqrt{k_{m2}k_l}\delta X(\omega)_{A_l}}{k - i\omega} \quad (7)$$

$$\delta X(\omega)_{A_{refl}} = \frac{(2k_{m1} - k + i\omega)\delta X(\omega)_{A_{in}} + 2\sqrt{k_{m1}k_{m2}}\delta X(\omega)_{A_{aux}} + 2\sqrt{k_{m1}k_l}\delta X(\omega)_{A_l}}{k - i\omega} \quad (8)$$

根据公式  $V = \delta^2 X(\omega) - \delta X(\omega)^2$  就可以得到模清洁剂透射场及反射场的强度噪声谱。注意到  $V_L = 1$ , 即由内腔损耗引入的噪声相当于真空噪声

$$V_{out} = \frac{4k_{m2}k_{m1}V_{in} + [(2k_{m2} - k)^2 + \omega^2]V_{aux} + 4k_{m2}k_l}{k^2 + \omega^2}$$

$$V_{refl} = \frac{[(2k_{m1} - k)^2 + \omega^2]V_{in} + 4k_{m1}k_{m2}V_{aux} + 4k_{m1}k_l}{k^2 + \omega^2} \quad (9)$$

若选用相同的腔镜  $M_1, M_2$  即  $k_{m1} = k_{m2}$ , 那么在理想情况下  $k = k_{m1} + k_{m2}$ , 则由上式可知, 当  $\omega \rightarrow 0$  时,  $V_{out}(0) \rightarrow V_{in}$ ;  $V_{refl}(0) \rightarrow V_{aux}$ 。表示在低频处模清洁剂输出场的噪声主要表现为输入光场的噪声, 输入耦合镜反射场的噪声则主要表现为输出耦合镜引入的真空场噪声。

表 2 模清洁剂参数表

Table 2 Parameters of mode cleaner

Cavity length of the mode cleaner	$L_{clear}$	2.25 m
Transmission of the input coupling mirror	$T_{in}$	2%
Transmission of the output coupling mirror	$T_{out}$	2%
Reflection of the curved mirror	$R_3$	> 99.5%
Intracavity losses	$A$	0.8%
Decay rate of the input coupling mirror	$k_{1m}$	$2.01 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
Decay rate of the output coupling mirror	$k_{2m}$	$2.01 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
Decay rate of the intracavity losses	$k_l$	$5.3 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$
Total cavity decay rate	$k$	$4.7 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$

当  $\omega \rightarrow \infty$  时恰好相反,  $V_{out}(\infty) \rightarrow V_{aux}$ ,  $V_{refl}(\infty) \rightarrow V_{in}$ 。表示在高频处模清洁剂输出光场的噪声主要表现为真空场的噪声, 而输入耦合镜反射场的噪声主要表现为输入光场的噪声。因此, 可以说无源腔对于透射场而言相当于一个低通滤波器, 对于反射场而言相当于一个高通滤波器。我们可以利用其透射场通低频、阻高频的特性来改善激光器

输出激光的强度噪声特性。

在给定一个模清洁器的各参数以后(见表 2), 利用(9)式获得了过滤噪声后激光的强度噪声谱曲线。如图 4 所示, 过滤后激光的强度噪声谱在低频段明显得到了降低且达到散粒噪声极限的频率, 由 30 MHz 降低至 5 MHz。

### 3 模清洁剂的设计

为了有效地降低激光器的强度噪声, 模清洁剂腔的线宽应尽可能地窄<sup>[6]</sup>。获得窄线宽的方法有两种: 一是增加腔长; 二是提高腔的精细度。使用长腔显然会导致腔的机械稳定性变差, 给锁腔带来困难, 而腔精细度过高又必然减小透射效率, 因此在设计模清洁剂腔时, 应兼顾窄线宽与透射效率两方面的要求。我们首先根据现有元件的内腔损耗和所需达到的最低透射效率选定输入输出耦合镜的透射率, 然后再根据所要求的腔线宽确定腔的长度。

模清洁器的透射效率  $\eta = \frac{4T_1T_2}{(T_1 + T_2 + A/2)^2}$ ,  $A$  为内腔损耗功率, 包括镜面散射及由凹面镜不完全反射带来的损耗。在我们的实验条件下, 可利用的 1.06  $\mu\text{m}$  高反镜  $M_1, M_2$  散射损耗为 0.1%, 凹面镜  $M_3$  的反射率大于 99.5%。估计内腔损耗最小为 0.6%。此时要获得大于 70% 的透射率, 应选用反射率为 98% 的输入输出耦合镜。腔镜参数选定后再确定腔长, 要获得低于 1 MHz 的腔线宽, 一个 2.25 m 的长腔足以满足要求。

### 4 实验装置及结果

图 2 所示为自行设计制作的 LD 抽运单频全固化 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器。当抽运功率为 3.4 W 时, 输出功率为 500 mW 的单频红外激光, 其偏振方向为  $s$  偏振光。 $F$  为匹配透镜, 使激光器与模清洁剂的高斯光束相匹配。模清洁剂为三镜环行腔结构,  $M_1$  为输入耦合镜,  $M_2$  为输出耦合镜。它们均为 45° 入射, 对  $s$  光反射率为 98% 的平面镜。 $M_3$  为反射率 99%, 曲率为 1.5 m 的凹面镜。采用边带稳频方法将模清洁剂锁定在激光频率上。当模清洁剂腔前功率为 400 mW 时, 锁定后透过功率为 280 mW, 效率达 70%, 功率波动小于 1%。

模清洁剂前后激光的强度噪声采用平衡零拍法进行探测。波片和棱镜用来调节进入光探测器的功率使之平衡。在实验中, 探测器接收到的光功率均

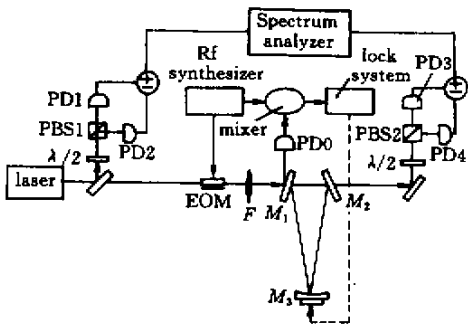


图2 测量激光强度噪声谱的实验装置图  
 PD 光探测器 ; PBS : 偏振分束器 ; EOM : 电光调制器  
 Fig.2 Experimental diagram for the measurement  
 of noise spectra  
 PD : photo detector ; PBS : polarization beam splitter ;  
 EOM : electro-optic modulator

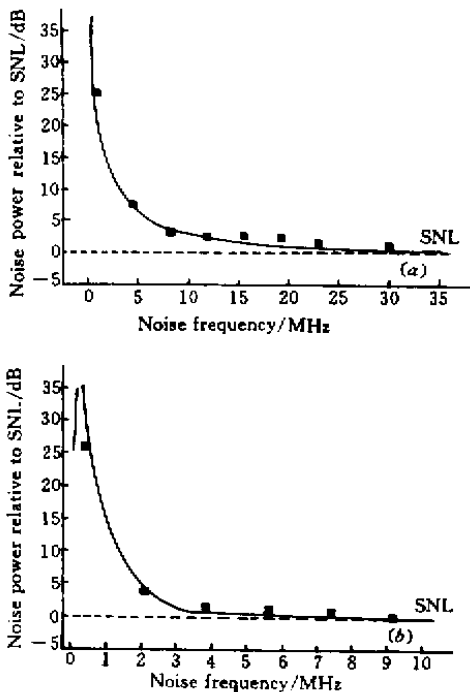


图3 模清洁剂前(a)和后(b)激光的强度谱曲线  
 实线为理论曲线 ■ 为实验测定值 SNL 指散粒噪声基准  
 Fig.3 Noise spectra of the laser without the  
 mode-cleaner(a) and with the mode-cleaner(b)  
 ■ are the experimental values and the solid line is the  
 theoretical spectrum. SNL : the shot-noise limit

为 12 mW。探测器 PIN 采用 ETX300 型光电探测器，对 1.064  $\mu\text{m}$  波长的光量子效率为 90%。光接收面半径为 300  $\mu\text{m}$ ，并加一级低噪声放大，与光电二极管一同封装在金属盒内。放大后的光电流注入频谱分析仪(型号 HP8890L)进行噪声谱分析。由于探测器在低频段有很大增益，当谱仪分辨率足够高时无

法观察到很宽频段的噪声曲线，所以在实验中只对其中某些频率进行了测量。图 3(a)(b)分别为模清洁剂前后激光的强度噪声谱的理论曲线与实验曲线。图中可以看到激光器输出激光在低频段噪声很大，噪声尾延续到 30 MHz 才接近散粒噪声基准。通过模清洁剂后激光的强度噪声明显得到了降低，且在 7 MHz 达到散粒噪声极限。可以看出理论曲线与实验结果基本符合。

## 5 结 论

利用由三镜环行腔构成的模清洁剂过滤高频噪声的特性使单频 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器输出激光的强度噪声得到了降低。实验测得过滤后激光的强度噪声在 7 MHz 附近达到了散粒噪声极限，腔的透过效率达到 70%。量子光学计算表明<sup>[7]</sup>，通过非线性光学效应可产生的压缩态光场在低频端压缩度较高，因此降低抽运源的低频噪声对非经典光场的产生与应用都十分重要。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Chen Yanli *et al.*. Intensity noise properties of LD pumped single-frequency ring lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(10): 1311 ~ 1316 (in Chinese)
- 2 Zhang Kuanshou. Theoretical and experimental research on generation of intensity squeezed light at 532 nm by an All-Solid-State optical system. *Doctor of Philosophy*, 1998 (in Chinese)
- 3 S. T. Yang, Y. Imai, M. Oka *et al.*. Frequency stabilized, 10-W continuous-wave, laser-diode end-pumped, injection-locked Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1676 ~ 1678
- 4 S. Rowan, A. M. Campbell, K. Skeldon *et al.*. Broadband intensity stabilization of a diode-pumped monolithic miniature Nd...YAG ring laser. *J. Mod. Opt.*, 1994, **41**(6): 1263 ~ 1269
- 5 B. Willke, N. Uehara, E. K. Gustafson *et al.*. Spatial and temporal filtering of a 10-W Nd:YAG laser with a Fabry-Perot ring-cavity premode cleaner. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21): 1704 ~ 1706
- 6 Matthew Scott Taubman. The quantum mechanics electro-optic feedback, second harmonic generation, and their interaction. *Doctor of Philosophy* (Australian National University), 1995
- 7 M. J. Collett, D. F. Walls. Squeezing spectra for nonlinear optical systems. *Phys. Rev. A*, 1985, **32**(5): 2887 ~ 2892