

激光二极管抽运的环形单频激光器的 强度噪声特性研究*

张 靖 张宽收 陈艳丽 张天才 谢常德 彭宝堃
(山西大学光电研究所, 太原 030006)

摘 要 实验测定了激光二极管抽运的 Nd·YVO₄、Nd·YAG 和 Nd·YAP 环形单频激光器的强度噪声谱, 并与激光器的量子理论模型计算结果作了对比。研究表明, 激光二极管抽运的单频激光器输出的激光并非相干态光场, 在几百 kHz 的频率上存在高于量子噪声几十 dB 的弛豫振荡, 而在远高于弛豫振荡的频率范围达到量子噪声基准, 且随抽运功率的增大, 弛豫振荡的频率将向高频方向移动, 而弛豫振荡的幅度减小。

关键词 环形单频激光器, 强度噪声, 量子噪声极限。

1 引 言

激光器量子理论模型表明^[1], 激光二极管抽运的全固化单频固体激光器, 输出激光的强度噪声在几个 kHz 到几个 MHz 频率之间存在弛豫振荡, 弛豫振荡噪声受抽运噪声的影响较小, 即使抽运光为振幅压缩光也还存在着很强的弛豫振荡^[1, 2]。这是因为弛豫振荡噪声主要由自发辐射噪声、偶极起伏噪声以及由输出耦合镜引入的真空起伏引起。在小于弛豫振荡的低频范围内, 激光器的强度噪声主要受抽运噪声的影响, 基本处于抽运噪声水平。近几年人们对激光二极管抽运的单块 YAG 非平面环形激光器的强度噪声进行了大量的研究, 采用注入锁定^[3, 4]、光电反馈^[5, 6]等技术实现对弛豫振荡的抑制。

本文利用包括抽运噪声及量子起伏的理论模型, 研究真实激光器的强度噪声谱, 并与实验上采用四镜环形谐振腔^[7]分别得到的 Nd·YVO₄、Nd·YAG 和 Nd·YAP 单频输出的强度噪声谱相对比, 从中看出全固化单频激光器输出的强度噪声谱与理论模型相一致。

2 理论模型

已有许多理论文献描述了激光器的噪声特征^[8]。最近发展的传递函数理论, 通过解具有与各种外部量子力学热库耦合的激活原子和光学谐振腔模的量子朗之万(Langevin)方程^[9], 直接给出各种噪声源对激光器强度噪声的影响^[1]。外部热库产生耗散将噪声引入激光系统, 在稳态解附近对量子朗之万方程作线性化处理, 可以得到激光输出的强度噪声谱。强度噪声

* 国家自然科学基金(No. 19674034, No. 69837010)及山西省自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1999-04-20; 收到修改稿日期: 1999-09-27

谱以各种量子与经典噪声源到输出激光强度噪声之间的传递函数形式给出。

考虑一个激光二极管抽运的环形固体激光器，用如图 1 所示的模型来描述。它包括三部分：抽运速率为 Γ 的抽运源——激光二极管；具有 N 个用三能级系统描述的激活原子的激光介质；激光谐振腔的腔模。 J_1 、 J_2 和 J_3 分别为激活原子的基态、下能级及上能级的粒子数分布概率。 G 描述原子跃迁与激光腔模之间耦合的受激辐射速率，它正比于原子跃迁的受激辐射截面

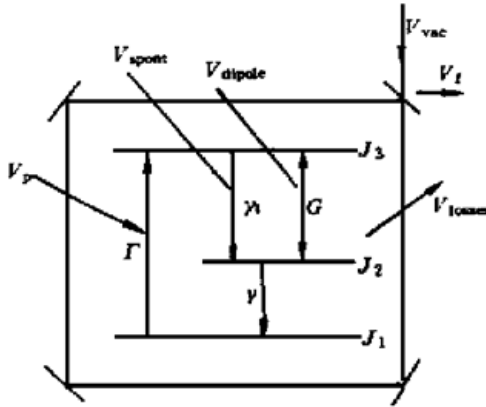


Fig. 1 The diode-pumped laser is described by the quantum model

$G = \sigma_s \rho c l / n L$, (1) 其中 σ_s 为受激辐射截面， ρ 为 Nd 离子密度， c 为光速， n 为 Nd:YVO₄ 晶体的折射率， l 为增益介质长度， L 为激光谐振腔长。上能级的自发辐射速率为 γ_1 ，下能级的自发辐射速率为 γ ，总的腔衰减速率 $k = (k_m + k_1)$ ， k_m 由输出镜耦合损耗引起， k_1 由内腔损耗引起。注入噪声包括来自输出耦合镜的真空噪声 (V_{vac})，抽运光的强度噪声 (V_p)，自发辐射噪声 (V_{spont})，偶极起伏噪声 (V_{dipole}) 以及内腔损耗引入的噪声 (V_{losses})。假定激光下能级的衰减非常迅速，则由此衰减引起的自发辐射噪声可以忽略不计。激光器输出激光的强度噪声谱表示为各种噪声源影响的传递函数^[1]

$$V_f = [1 + \frac{4k_m^2(\omega^2 + \gamma_1^2) - 8k_m k G \alpha^2 \gamma_1}{(\omega^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2}] V_{vac} + [\frac{2k_m G^2 \alpha^2 \Gamma}{(\omega^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2}] V_p + [\frac{2k_m G^2 \alpha^2 \gamma_1 J_3}{(\omega^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2}] V_{spont} + \{ \frac{2k_m G J_3 [(\gamma_1 + \Gamma)^2 + \omega^2]}{(\omega^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2} \} V_{dipole} + [\frac{4k_m k_1 (\gamma_1^2 + \omega^2)}{(\omega^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_1^2}] V_{losses}, \tag{2}$$

其中 α^2 是每个原子所对应的内腔光子数，

$$\alpha^2 = (\Gamma - \gamma_1 J_3) / 2k, \tag{3}$$

J_3 是上能级粒子数分布概率

$$J_3 = 2k / G. \tag{4}$$

抽运速率 Γ 为

$$\Gamma = P_{in} \eta_t \eta_a \eta_q / h \nu_p N, \tag{5}$$

其中 P_{in} 为激光二极管的抽运功率， η_t 为抽运光传输效率(进入增益介质中的抽运光功率与激光二极管输出的抽运光功率之比)， η_a 为增益介质的吸收效率， η_q 为量子效率，它表示一个抽运光子平均激发的受激粒子数， N 为增益介质中的所利用的 Nd 离子数， $h \nu_p$ 为抽运光子能量。 ω_r 为弛豫振荡(RRO)的频率，

$$\omega_r = \sqrt{2k G \alpha^2} = \sqrt{2k \gamma_1 (r - 1)}, \tag{6}$$

其中归一化抽运因子 $r = P_{in} / P_{th}$ ，抽运阈值功率 $P_{th} = \frac{2A_e I_{sat}}{\eta_p} \frac{kL}{c}$ ， A_e 为激光有效模面积，饱和光功率 $I_{sat} = \frac{h \nu \gamma_1}{\delta_s}$ ， ν 为激光频率，总的抽运效率为 $\eta_p = \eta_t \eta_a \eta_q \frac{\nu}{\nu_p}$ 。 γ_1 为弛豫振荡的阻尼速率，

$$\gamma_1 = G \alpha^2 + \gamma_1 + \Gamma = \gamma_1 r + \Gamma. \tag{7}$$

强度噪声谱已经用量子噪声极限(QNL)归一化，即当 $V_f = 1$ 时，输出激光的强度噪声处于量

子噪声极限。除 V_p 以外的其余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。

(2) 式含有许多实验中难以确定的量, 因此需对它进一步简化和近似。考虑到 $\gamma_i \gg \Gamma$, 当归一化抽运因子 $r > 1$ 时弛豫振荡的阻尼速率近似为 $\gamma_1 = \gamma_i r$ 。(2) 式变为

$$V_f = \left[1 + \frac{4k_m^2(\omega^2 + \gamma_i^2) - 8k_m k_1 \gamma_i \gamma_1 (r - 1)}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \right] V_{\text{vac}} + \left[\frac{4k_m k_1 \gamma_i^2 r (r - 1)}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \right] V_p + \left[\frac{4k_m k_1 \gamma_i^2 (r - 1)}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \right] V_{\text{spont}} + \left[\frac{4k_m k_1 (\gamma_i^2 + \omega^2)}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \right] V_{\text{dipole}} + \left[\frac{4k_m k_1 (\gamma_i^2 + \omega^2)}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \right] V_{\text{losses}}. \quad (8)$$

可以由实验测量的参数 k_m 、 k_1 、 γ_i 和 P_{th} 通过(8) 式计算出激光器输出强度噪声谱。表 1 给出了 Nd·YVO₄ 环形单频激光器的参数。

Table 1. Parameters of single-frequency ring Nd·YVO₄ laser

optical cavity length	L	300 mm
transmission of the output coupling mirror	T	4%
intracavity losses	δ_{cav}	2%
max. pump power	P_{max}	3.4 W
decay rate of the output coupling mirror	k_m	$1.71 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
decay rate of the intracavity losses	k_1	$8.55 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
total cavity decay rate	k	$2.56 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
spontaneous emission from upper laser level	γ_i	10^4 s^{-1}
lasing threshold	P_{th}	300 mW

由(8) 式给出的激光器强度噪声谱示于图 2 和图 3。图 2 给出激光器输出的强度噪声谱与抽运功率的关系。图中激光强度噪声用量子噪声极限(QNL) 归一化, 它用对数坐标 $10 \lg V_f$ 表示, 横坐标用 $\lg(\omega/2\pi)$ 表示。因此 0 dB 表示量子噪声基准($V_f = 1$)。图 3 表示归一化抽运因子 $r = 10$ 时, 不同抽运光的噪声 V_p 对激光输出强度噪声的影响。从两幅图中看出, 弛豫振荡主要是由真空起伏、偶极起伏及内腔损耗引起, 抽运噪声对弛豫振荡的影响较小, 抽运噪声主要对远低于弛豫振荡的频率范围有影响。激光器输出的强度噪声谱随抽运功率的增大, 弛豫振荡的频率将向高频方向移动, 而弛豫振荡的幅度减小[见(6) 式]。

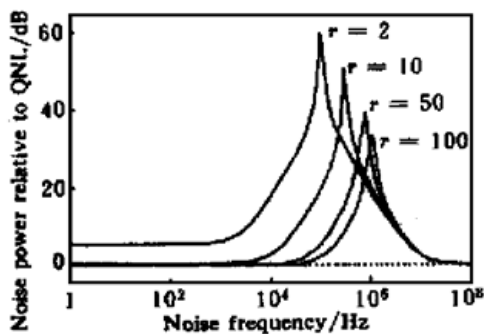


Fig. 2 Intensity noise spectra with the different normalized pump rate r . The QNL is indicated by the dashed line. ($V_p = 1$)

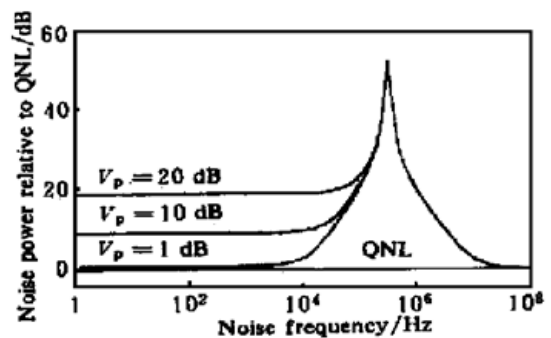


Fig. 3 Intensity noise spectra with different pump noise V_p . Normalized pump rate r is 10

3 实验装置

图 4 为测量全固化单频激光器强度噪声谱的实验装置图。采用一维线阵激光二极管作为抽运光源, 中心波长在 809 nm 处, 型号为 SDL-2382-P1。它的发光面为 $1\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$, 发散角为 $34^\circ \times 10^\circ$, 阈值电流为 2 A, 最大工作电流 6 A 时输出功率达 4 W。抽运光经自聚焦透镜和两块正交柱面镜组成的准直系统, 整形为光斑尺寸成 $3\ \text{mm} \times 12\ \text{mm}$ 的近似平行光。抽运光由反射镜反射出一部分光进入 PD₁ 直接测量它的强度噪声。 $\lambda/2$ 波片和偏振棱镜用来调节进入探测器的光功率。PIN 光探测器型号为 FND-100, 光接收面为 $5\ \text{mm}^2$, 响应时间为 1 ns, 后面为一级低噪声放大。为防止周围环境的干扰, 整个探测系统封装在金属盒内。放大后的光电流进入频谱分析仪(型号 HP8890L) 记录其噪声。测量完抽运光噪声后需用白光光源照射探测器来校准量子噪声基准。实验使用 BX-1 型投影仪, 在探测器上相同直流输出的条件下记录交流输出的噪声, 此噪声就为相同光功率下的量子噪声基准。

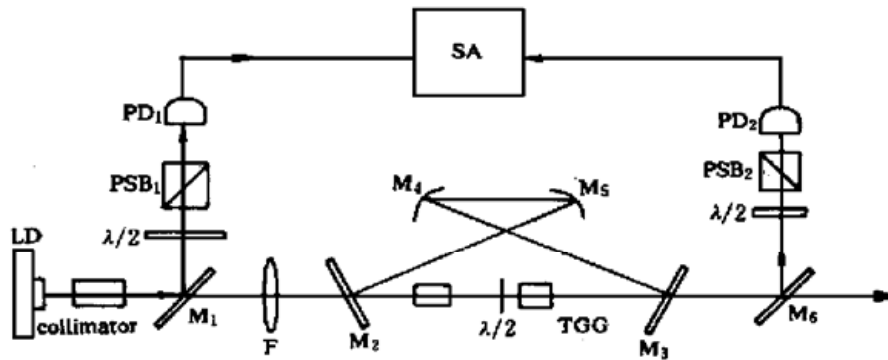


Fig. 4 The experimental setup for the measurement of the intensity noise spectra of the all-solid-state laser

在测量完抽运光噪声后, 经准直的抽运光由 $f = 50\ \text{mm}$ 的聚焦透镜聚焦到增益介质中。谐振腔采用四镜环形腔, M_4 、 M_5 是曲率半径为 50 mm 的凹面镜, M_2 为平面镜, 它们都镀有 $1.06\ \mu\text{m}$ 的全反膜, M_3 是反射率为 96% 的平面输出耦合镜。腔内放有 $\lambda/2$ 波片和外加磁场的 TGG 晶体组成的光二极管, 它的法拉第旋转角约为 5° 。Nd·YVO₄ 和 Nd·YAP 是各向异性晶体, 它们都为偏振光输出, 因此可利用它们的不同偏振方向所对应的激发截面不同, 与光二极管相作用使正反向运转的激光形成增益差, 从而强迫激光单向运转实现单频输出。而 YAG 为各向同性晶体, 激光输出为自然光, 因此腔内需加入一熔融石英薄片并按布儒斯特角方位放置, 使腔内激光的某一偏振方向起振, 并且布儒斯特窗片与光二极管相结合引入正反向损耗差, 实现腔内激光单向运转, 获得单频红外输出。

由探测器 PD₂ 直接探测激光器输出的强度噪声, $\lambda/2$ 波片和偏振棱镜用来调节进入探测器的光功率使之成为恒定值。PIN 光探测器采用 ETX300 型, 对 $1.064\ \mu\text{m}$ 波长的光量子效率为 90%。光接收面半径为 $300\ \mu\text{m}$ 。后面为一级低噪声放大, 与光电二极管一同封在金属盒内。测完强度噪声后, 用白光光源照射探测器, 在相同的直流光电流下获得量子噪声基准。

4 实验结果

通过直接探测测得抽运源的强度噪声如图 5 所示。激光二极管的抽运功率为 3.4 W, 进入探测器的功率为 1.8 mW。图中 1 为激光二极管的强度噪声, 2 为白光校准量子噪声基准,

3 为电子学噪声。因探测器在 2.5 MHz 处增益较高, 图中曲线 2 和 1 在此频率处噪声功率相对较高。

直接探测全固化 Nd·YVO₄ 单频激光器输出的强度噪声谱如图 6 所示。图 6 中 1(b) 为 Nd·YVO₄ 单频激光器在抽运功率 750 mW 时输出 1.064 μm 55 mW, 2(b) 表示 2 W 抽运时输出 220 mW, 3(b) 表示抽运功率 3.4 W 时输出 560 mW。探测功率均为 3 mW, 频谱仪在 0~ 500 kHz 范围内记录其噪声并考虑了测量过程中的光衰减。1(a)、2(a)、3(a) 为各自实验参数条件下代入(8)式得到的理论曲线。从图 6 可看出, 实验与理论数据吻合较好, 弛豫振荡频率随抽运功率增大而向高频移动, 但弛豫振荡的幅度减小。因探测器低于 150 kHz 频率范围增益较低, 量子噪声基准小于或等于电子学噪声。当激光器高于量子噪声基准时其强度噪声的测量出现了误差, 与理论曲线有一定的偏差。图 7 给出 Nd·YVO₄、Nd·YAG 和 Nd·YAP 在 3.4 W 抽运下单频输出的强度噪声谱。Nd·YAG 抽运阈值功率为 700 mW, 3.4 W 抽运时单频红外输出为 350 mW。Nd·YAP 抽运阈值功率为 2 W, 3.4 W 抽运时单频红外输出为 120 mW。可以看出, 弛豫振荡是激光二极管抽运的全固化单频激光器普遍存在的现象。图 6 和图 7 中 Nd·YVO₄ 晶体的噪声谱在 170 kHz 和 330 kHz 处存在着强烈的寄生振荡, 不随抽运功率变化而变化。Nd·YAG 和 Nd·YAP 晶体不存在此振荡, 整个曲线较为光滑。

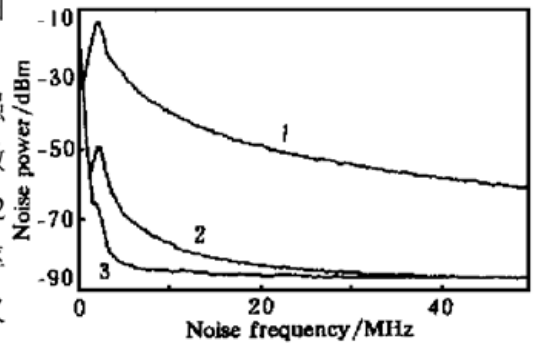


Fig. 5 Intensity noise spectrum of the diode pumped laser. 1 is the noise of diode laser. 2 is the QNL. 3 is the electronic noise

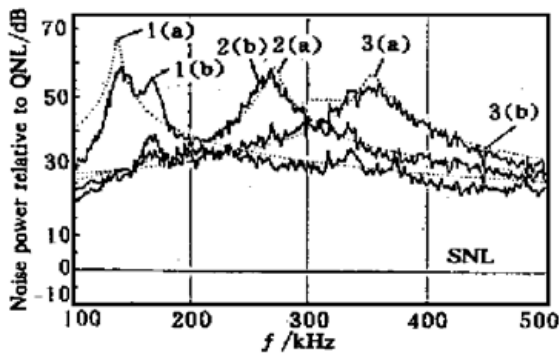


Fig. 6 The theoretical prediction can the experimental measurement of intensity noise spectra of Nd·YVO₄. 1(a) and 1(b) $P_{in} = 750 \text{ mW}$, $P_{out} = 55 \text{ mW}$; 2(a) and 2(b) $P_{in} = 2 \text{ W}$, $P_{out} = 220 \text{ mW}$; 3(a) and 3(b) is $P_{in} = 3.4 \text{ W}$, $P_{out} = 560 \text{ mW}$, $P_{th} = 300 \text{ mW}$

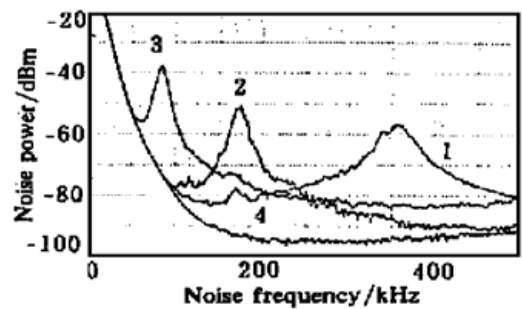


Fig. 7 The intensity noise spectra of 1 Nd·YVO₄, 2 Nd·YAG and 3 Nd·YAP single-frequency laser with pumping power 3.4 W. 4 is the QNL

结 论 利用激光器量子理论模型分析了激光二极管抽运的全固化单频激光器的强度噪声谱, 并通过实验给出激光二极管抽运的 Nd·YVO₄、Nd·YAG 和 Nd·YAP 环形单频激光器的强度噪声, 从中看出激光二极管抽运的单频激光器输出的激光并非相干态光场, 在几百 kHz 的频率上存在高于量子噪声几十 dB 的弛豫振荡。弛豫振荡噪声主要由量子起伏引起, 而受抽运噪声的影响较小, 但在小于弛豫振荡频率范围内激光器的强度噪声主要受抽运噪声的影响, 基本处于抽运噪声水平。当频率远高于弛豫振荡频率的范围时, 其噪声达到量子噪声基

准。激光器输出的强度噪声随抽运功率的增大,弛豫振荡的频率将向高频方向移动,而弛豫振荡的幅度减小。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噪声的压缩度。因此应该首先使用注入锁定、光电反馈等技术来抑制激光二极管抽运单频激光器的经典噪声,使之接近量子噪声基准。

参 考 文 献

- [1] Ralph T C, Harb C C, Bachor H A. Intensity noise of injection locked lasers: Quantum theory using a linearized input/output method. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **54**(5) : 4359~ 4369
- [2] Becher C, Boller K J. Intensity noise properties of Nd:YVO₄ microchip lasers pumped with an amplitude squeezed diode laser. *Opt. Commun.*, 1998, **147**(4/6) : 366~ 374
- [3] Yang S T, Imai Y, Oka M *et al.*. Frequency stability, 10-W continuous-wave, laser-diode end-pumped, injection-locked Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21) : 1676~ 1679
- [4] Farinas A D, Gustafson E K, Bayer R L. Frequency and intensity noise in an injection-locked solid-state laser. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(2) : 328~ 334
- [5] Rowan S, Campbell A M, Skeldon K *et al.*. Broadband intensity stabilization of a diode-pumped monolithic miniature Nd:YAG ring laser. *J. Mod. Optics*, 1994, **41**(6) : 1263~ 1269
- [6] Harb C C, Bachor H A, Schilling R *et al.*. Suppression of the intensity noise in a diode-pumped Nd:YAG nonplanar ring laser. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(12) : 2907~ 2913
- [7] 张宽收, 张云, 谢常德等. 全固化非平面单频 Nd:YAG 环形激光器. *光学学报*, 1996, **16**(8) : 1041~ 1044
- [8] Louisell W H. *Quantum Statistical Properties of Radiation*. New York: Wiley-International, 1973.
- [9] Gardiner C W, Collett M J. Input and output in a damped quantum system: quantum stochastic differential equations and the master equation. *Phys. Rev. (A)*, 1985, **31**(6) : 3761~ 3776

Intensity Noise Properties of LD Pumped Single-Frequency Ring Lasers

Zhang Jing Zhang Kuanshou Chen Yanli Zhang Tiancai
Xie Changde Peng Kunchi

(*Institute of Opto-Electronic Research, Shanxi University, Taiyuan 030006*)

(Received 20 April 1999; revised 27 September 1999)

Abstract Intensity noise spectra of LD pumped Nd:YVO₄, Nd:YAG and Nd:YAP single-frequency ring laser are measured experimentally and compared with the spectra calculated with laser quantum model. The results show that there is an intensity noise about tens dB higher than the shot noise level (SNL) at the frequency of several hundred kHz deriving from resonant relaxation oscillation (RRO). In the frequency range of far above RRO, the intensity noise reaches to the SNL. The peak of the RRO shifts to higher frequencies and the height of peak reduces as the pump power increases.

Key words single-frequency ring laser, intensity noise, quantum noise limit.