

## LD 泵浦 Nd:YAG 激光器的强度噪声特性研究\*

张宽收 张靖 谢常德

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

**摘要** 本文在理论上研究了 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器的强度噪声特性,用传递函数的形式给出各种噪声源对激光器强度噪声的影响,计算结果指出 Nd:YAG 激光器输出的激光并非相干态光场,在几兆频率上存在高于散粒噪声基准几十 dB 的弛豫振荡噪声,在小于弛豫振荡频率范围,激光器的强度噪声基本上处于泵浦噪声水平。

**关键词** 强度噪声, 标准量子极限

**中图法分类号** O431

### 0 引言

激光具有以前光源所不具备的优良特性,如方向性、单色性等。特别是采用激光二极管作为泵浦源的全固化单频激光器,可以实现很好的频率稳定性和强度稳定性。但由于光的量子特性,即由海森堡测不准原理引入的量子噪声,使激光器输出的激光光场的强度和频率仍存在着量子起伏。

LD 泵浦 Nd:YAG 激光器的激光特性可以用量子模型<sup>[1,2]</sup>来描述,这些模型揭示出理想激光器输出激光的强度噪声在原理上可以接近标准量子噪声极限。然而在真实的激光器中,由于泵浦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。在利用二次谐波过程产生非经典光场时,由于激光器的这种经典噪声的存在,实验结果将受到很大影响。因此,有必要对真实激光器输出激光的强度噪声特征有所了解。我们利用一个包括泵浦噪声及量子起伏的理论模型<sup>[3]</sup>来研究真实激光器的强度噪声谱,看到 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器输出的激光并非真正的相干态光

\* 国家自然科学基金资助的课题(编号:19674034)

收稿日期:1998-08-18

场,在几兆频率上存在很高的弛豫振荡噪声,弛豫振荡噪声主要由量子起伏引起,而受泵浦噪声的影响较小。但在小于弛豫振荡频率的范围,激光器的强度噪声主要受泵浦噪声的影响,基本上处于泵浦噪声水平。

## 1 理论模型

已有许多文献给出合适的理论来描述 Nd:YAG 激光器的噪声特征,如 Louisell<sup>[1]</sup>。最近发展的传递函数理论直接给出各种噪声源对激光器强度噪声的影响<sup>[3]</sup>。基本途径是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 Langevin<sup>[4]</sup>方程。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 Langevin 方程作线性化处理,可以得到激光输出的强度噪声谱。强度噪声谱用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。

我们考虑一个激光二极管泵浦的环形 Nd:YAG 激光器,用如图1所示的模型来描述。它包括三部分:泵浦速率为  $\Gamma$  的泵浦源—激光二极管(LD);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  $a$ ,其期望值为  $\alpha$ 。激活原子的基态、下能级及上能级的粒子数算符分别用  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  及  $\sigma_3$  表示,他们的期望值分别为  $J_1$ 、 $J_2$ 、和  $J_3$ 。激光跃迁发生在上下能级之间,跃迁速率依赖于粒子数反转  $J_3 - J_2$ 、腔内平均光子数以及描述激光跃迁与激光腔模之间的耦合的受激辐射速率  $G$ 。受激辐射速率正比于原子跃迁的受激辐射截面

$$G = \frac{\sigma_s \rho c}{n} \quad (1)$$

其中  $\sigma_s$  是受激辐射截面,  $\rho$  是 Nd 离子密度,  $c$  是光速,  $n$  是 Nd:YAG 晶体的折射率。

上能级的自发辐射速率为  $\gamma_i$ ,下能级的自发辐射速率为  $\gamma$ ,总的腔衰减速率  $k = (k_m + k_l)$ ,  $k_m$  由输出镜耦合损耗引起,  $k_l$  由内腔损耗引起。

我们可以写出激光系统的半经典方程

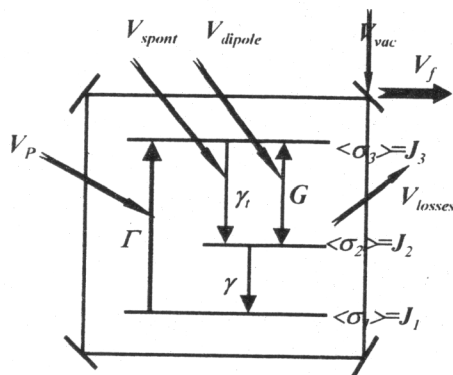


图1. 描述激光系统的模型

$\gamma_i$ 、 $\gamma$  为自发辐射速率,  $\Gamma$  为泵浦速率,  $G$  为受激辐射速率,  $V_f$  为激光器的输出场,  $V_{vac}$  为来自输出耦合镜的真空噪声,  $V_p$  为泵浦光的强度噪声,  $V_{spont}$  为自发辐射噪声,  $V_{dipole}$  偶极起伏噪声,  $V_{losses}$  为内腔损耗引入的噪声。

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \frac{G}{2}(J_3 - J_2)\alpha - k\alpha \\ J_1 = -\Gamma J_1 + \gamma J_2 \\ J_2 = G(J_3 - J_2)\alpha^2 + \gamma_i J_3 - \gamma J_2 \\ J_3 = -G(J_3 - J_2)\alpha^2 - \gamma_i J_3 + \Gamma J_1 \end{cases} \quad (2)$$

上述方程已用粒子数  $N$  归一化, 即只描述一个激光跃迁原子。因此, 能级上的粒子和应为 1

$$J_1 + J_2 + J_3 = 1 \quad (3)$$

解方程(2)的稳态解, 可以得到

$$\begin{cases} J_2 = \frac{1 - \frac{2k}{G}}{\frac{\gamma}{\Gamma} + 2} \\ J_1 = \frac{\gamma J_2}{\Gamma} \\ J_3 = J_2 + \frac{2k}{G} \\ \alpha^2 = \frac{J_2(\gamma - \gamma_i)}{2k} - \frac{\gamma_i}{G} \end{cases} \quad (4)$$

$\alpha^2$  是每个激光跃迁原子的内腔平均光子数。

在上述讨论的基础上, 可以在稳态解附近对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 Langevin 方程<sup>[4]</sup>作线性化处理, 并利用激光器腔镜的边界条件, 经傅里叶变换, 可以得到用下面传递函数表示的受各种噪声源影响的激光器输出激光的强度噪声谱<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} V_f = & \left\{ 1 + \frac{4k_m^2(\omega^2 + \gamma_i^2) - 8k_m k G \alpha^2 \gamma_i}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \right\} V_{vac} \\ & + \left\{ \frac{2k_m G^2 \alpha^2 \Gamma}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \right\} V_p + \left\{ \frac{2k_m G^2 \alpha^2 \gamma_i J_3}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \right\} V_{spont} \\ & + \left\{ \frac{2k_m G J_3 ((\gamma_i + \Gamma)^2 + \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \right\} V_{dipole} + \left\{ \frac{4k_m K_l (\gamma_i^2 + \omega^2)}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_i^2} \right\} V_{losses} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, 注入噪声有来自输出耦合镜的真空噪声 ( $V_{vac}$ ), 泵浦光的强度噪声 ( $V_p$ ), 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 ( $V_{losses}$ )。我们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。

$\omega_r$  为弛豫振荡 (RRO) 的频率

$$\omega_r = \sqrt{2kG\alpha^2} \quad (7)$$

$\gamma_l$  为弛豫振荡的阻尼速率

$$\gamma_l = G\alpha^2 + \gamma_i + \Gamma \quad (8)$$

强度噪声谱已经用量子噪声极限(QNL)归一化, 即当  $V_f = 1$  为激光器输出激光的强度噪声处于量子噪声极限。各种量子噪声源均处于量子噪声极限, 即  $V_{vac} = V_{spont} = V_{dipole} = V_{losses} = 1$ , 而泵浦光噪声  $V_p$  则由泵浦源激光二极管的强度噪声决定。

## 2 数值计算及分析讨论

下面我们将用 Nd:YAG 激光晶体及激光器的参数和方程(6) 来分析讨论全固化 Nd:YAG 激光器的强度噪声特性。

Nd:YAG 激光晶体的具体参数<sup>[5]</sup>及我们所用的激光二极管泵浦的单频激光器参数列在表1中。

表1 Nd:YAG 激光晶体<sup>[5]</sup>及全固化单频 Nd:YAG 激光器的参数

受激发射截面	$\sigma_s$	$6.5 \times 10^{-23} \text{m}^2$
Nd 离子密度	$\rho$	$1.38 \times 10^{26} \text{m}^{-3}$
光速	$c$	$2.997 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$
折射率	$n$	1.827
上能级自发辐射速率	$\gamma_i$	$4.3 \times 10^3 \text{s}^{-1}$
下能级自发辐射速率	$\gamma$	$3.3 \times 10^7 \text{s}^{-1}$
晶体长度	$l$	10mm
腔模平均腰斑半径	$\omega_0$	300 $\mu\text{m}$
谐振腔腔长	$L$	350mm
泵浦吸收功率	$P_{abs}$	1W
输出耦合镜透射率	$T$	4%
内腔损耗	$\delta_{cav}$	2%

利用表1中参数及公式(1)、(2)、(4), 可以计算出受激辐射速率  $G$ , 泵浦速率  $\Gamma$ , 每个激光跃迁原子的基态、下能级及上能级的平均粒子数  $J_1$ 、 $J_2$  和  $J_3$  和平均内腔光子数  $\alpha^2$ . 结果列于表2中。

表2 用于计算强度噪声谱的参数

泵浦吸收功率	$P_{abc}$	1W	2W
受激辐射速率	$G$	$1.477 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$	$1.477 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$
泵浦速率	$\Gamma$	$10.45 \text{s}^{-1}$	$20.95 \text{s}^{-1}$
输出耦合镜衰减速率	$k_m$	$3.42 \times 10^7 \text{s}^{-1}$	$3.42 \times 10^7 \text{s}^{-1}$
内腔损耗衰减速率	$k_l$	$1.71 \times 10^7 \text{s}^{-1}$	$1.71 \times 10^7 \text{s}^{-1}$
总的腔衰减速率	$k$	$5.13 \times 10^7 \text{s}^{-1}$	$5.13 \times 10^7 \text{s}^{-1}$
基态平均粒子数	$J_1$	0.99993	0.99993
下能级平均粒子数	$J_2$	$3.166 \times 10^{-7}$	$6.333 \times 10^{-7}$
上能级平均粒子数	$J_3$	$6.98 \times 10^{-5}$	$6.98 \times 10^{-5}$
内腔平均粒子数	$\alpha^2$	$9.89 \times 10^{-8}$	$2.01 \times 10^{-7}$
弛豫振荡频率	$\omega_r$	3.87MHz	5.5MHz

图2是在假定泵浦源噪声处于量子噪声极限水平 ( $V_p = 1$ ), 利用方程(6)及表1、2中的参数计算的激光二极管泵浦的Nd:YAG激光器的强度噪声谱曲线。(a)是激光器输出激光的强度噪声谱,(b)是由输出耦合镜注入的真空噪声的贡献,(c)是泵浦源强度噪声的贡献,(d)是自发辐射噪声的贡献,(e)是偶极起伏噪声的贡献,(f)是由内腔损耗引入的噪声的贡献。

由图2可以清楚地看出各种噪声对激光器强度噪声谱的贡献,各种噪声源均激发弛豫振荡,但是引起弛豫振荡的主要因素是真空起伏,偶极起伏及内腔损耗,泵浦噪声对弛豫振荡的影响较小。

仔细分析可以发现,在远大于弛豫振荡的频率范围 ( $>100\text{MHz}$ ) 只有真空起伏对强度噪声谱有贡献。由于存在真空起伏,强度噪声逐渐逼近量子噪声极限,而其它四种噪声源的贡献则很小。

在弛豫振荡频率与高频极限之间,只有真空噪声,偶极噪声及内腔损耗引入的噪声对强度噪声谱有贡献,而自发辐射噪声和泵浦噪声在此范围的影响较小。很明显,在弛豫振荡频率以上的频率范围只有量子起伏对噪声谱起支配作用。因此只有量子起伏发生改变,此频率

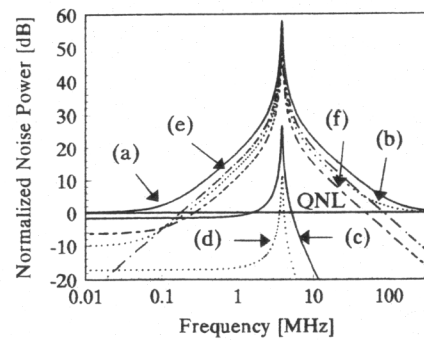


图2. 激光器的强度噪声谱(各种噪声源的贡献)  
(a)是激光器输出激光的强度噪声谱,(b)是由输出耦合镜注入的真空噪声的贡献,(c)是泵浦源强度噪声的贡献,(d)是自发辐射噪声的贡献,(e)是偶极起伏噪声的贡献,(f)是由内腔损耗引入的噪声的贡献。QNL是标准量子极限。

范围的强度噪声才会发生改变。

在弛豫振荡频率与100KHz之间的频率范围,强度噪声仍由真空起伏噪声,偶极起伏噪声及内腔损耗引入的噪声支配。频率低于100KHz范围才由泵浦噪声支配。应该注意到自发辐射噪声对噪声谱的贡献较小,一般可以忽略不计。

对于一个参数给定的Nd:YAG激光器, $G$ 、 $\gamma_r$ 、 $\gamma$ 、 $k$ 、 $k_m$ 、 $k$ 均为常数。 $\Gamma$ 、 $\alpha$ 可随泵浦吸收功率 $P_{abs}$ 变化而变化,则激光器的强度噪声仅随泵浦源的特性改变。图3是泵浦源对激光器的强度噪声谱的影响,

(a)泵浦吸收功率 $P_{abs} = 1W$ ,泵浦源噪声处于量子噪声极限水平 $V_p = 0dB$ 。(b)泵浦吸收功率 $P_{abs} = 1W$ ,泵浦源噪声 $V_p = 20dB$ 。(c)泵浦吸收功率 $P_{abs} = 2W$ ,泵浦源噪声 $V_p = 20dB$ 。比较(a)与(b),发

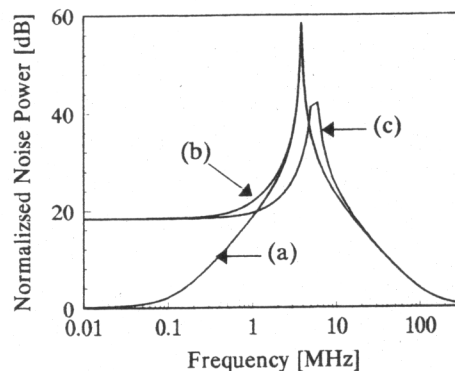


图3 激光器的强度噪声谱(泵浦源的影响)

现在低频段激光器的强度噪声主要受泵浦噪声的影响,基本上处于泵浦噪声水平。因此,我们可以使用某种技术,比如光电负反馈方法<sup>[6]</sup>通过抑制泵浦激光的噪声来降低Nd:YAG激光器的强度噪声。比较(a)与(c),发现随着泵浦吸收功率增大,弛豫振荡的频率将向高频方向移动(方程7),而弛豫振荡的幅度则由于衰减增加而减小(方程8)。因此也可以通过增加泵浦强度来改变激光器的强度噪声谱。

### 3 结论

我们在理论上分析了Nd:YAG激光器的强度噪声谱。讨论了来自输出耦合镜的真空噪声,泵浦光的强度噪声,自发辐射噪声,偶极起伏噪声以及内腔损耗引入的噪声对激光器强度噪声的贡献。计算结果指出Nd:YAG激光器输出的激光并非相干态光场,在几兆频率上存在高于散粒噪声基准几十dB的弛豫振荡噪声,弛豫振荡噪声主要由量子起伏起支配作用,受泵浦噪声的影响较小。但在小于弛豫振荡频率范围,激光器的强度噪声主要受泵浦噪声的影响,基本上处于泵浦噪声水平。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。因此我们可以通过使用光电负反馈等技术降低泵浦光强度噪声来抑制Nd:YAG激光器的经典噪声,使之接近散粒噪声极限。

## 参考文献

- 1 Louisell W H. *Quantum Statistical Properties of Radiation*, Wiley-International, New York, 1973
- 2 Haken H. *Laser Theory*, in *Encyclopedia of Physics*, XXX/2C, Ed. S. Flugge, Springer Verlag, Heidelberg, 1970
- 3 Ralph T C, et al. Intensity noise of injection locked lasers: Quantum theory using a linearised input/output method, *Phys. Rev.*, 1996, **A54**(6):4359
- 4 Gardiner C W, et al. Input and output in damped quantum system: Quantum stochastic differential equations and the master equation. *Phys. Rev.*, 1985, **A31**(6):3761
- 5 Koechner W. *Solide-state Laser Engineering*. Springer Verlag, Berlin, 1988
- 6 Harb C C, et al. Suppression of the Intensity Noise in a Diode-Pumped Nd:YAG Nonplanar Ring Laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1994, **30**(12):2907

## Theoretical Studies of the Intensity Noise of LD Pumped Nd:YAG Laser

Zhang Kuanshou   Zhang Jing   Xie Changde

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

## Abstract

The intensity noise of all-solid-state Nd:YAG laser is theoretical analysed and the dependence of intensity noise of laser on the noise sources is given with the formulas of transfer function. The results of calculation show that at the frequency of several MHz there is the intensity noise from resonant relaxation oscillation (RRO) that is tens dB above the SNL and the quantum fluctuations play a dominant part in RRO and at the frequencies below the RRO the intensity noise of laser is dominated by the pump source noise.

**Keywords** Intensity Noise, Shot Noise Level

## 第一作者简介

张宽收,男,1965年8月生,博士,副教授,现工作于山西大学光电研究所,主要从事全固体化激光技术及非经典光场的产生与应用研究。