

激光二极管泵浦腔内倍频 $\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{KTP}$ 绿光噪声研究*

卢建仁 牟晓东 孔庆宇 王长青 邵宗书

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

摘 要 从实验上测量了 $\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{KTP}$ 腔内倍频激光器绿光噪声和腔长、泵浦功率的变化关系, 并从理论上进行了分析计算, 找出了多纵模情况下影响绿光噪声大小的关键因素, 理论计算与实验结果相一致。

关键词 激光二极管, 泵浦, 腔内倍频, 绿光噪声, 相对强度噪声。

1 引 言

自从激光二极管泵浦腔内倍频固体绿光激光器问世以来, 绿光噪声问题一直是困扰人们的主要问题。1986 年, Baer 从激光速率方程出发, 解释了纵模和频效应和交叉饱和是引起绿光问题的主要原因^[1]。1995 年, 美国光谱物理公司利用长腔较好地解决了绿光噪声问题^[2], 但并没有给出理论证明。其后, 还有一些作者对此进行了理论分析^[3, 4], 但他们都局限于 2~3 个纵模的短腔情况, 长腔情况由于计算复杂, 尚没有理论计算的报道。其实, 远在激光二极管泵浦腔内倍频绿光激光器问世以前, 就有用灯泵的腔内倍频固体绿光激光器, 此种激光器的腔长一般在 0.5~1.5 m, 当时绿光噪声问题并没有引起人们的重视。绿光噪声问题成为研究热点是在激光二极管泵浦的小型短腔固体绿光激光器问世以后。由此可知, 腔长的变化对绿光噪声大小的影响是很大的, 选择合适的腔长对激光器设计具有重要意义; 同时还观测到在一定腔长情况下随着泵浦功率的升高, 绿光噪声增加。本文从实验上测量了多纵模情况下绿光噪声和腔长、泵浦功率的变化关系, 并从理论上进行了分析计算, 找出了影响绿光噪声大小的关键因素。

2 实验结果

测量绿光噪声的实验装置如图 1 所示。其中激光二极管由中国科学院半导体研究所生产, 其最大输出功率 1 W; $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的一个端面和输出镜构成平凹腔结构; 探测器是高灵敏度的快速光电二极管; 电平表用来测量探测器的平均输出; 频谱仪是具有存贮功能的

* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1996-12-29; 收到修改稿日期: 1997-02-24

HP3585A 频谱分析仪, 用来测量探测器输出的噪声强度。

2.1 绿光噪声与腔长的关系

利用图 1 所示的实验装置测量了绿光噪声随腔长的变化情况。图 2 (a) 是当腔长等于 1 cm 时, 绿光输出(5 mW) 的示波器照片; 图 2(b) 是腔长等于 10 cm 时, 绿光输出(5 mW) 的示波器照片。从图 2(a) 和 2 (b) 的对比可以看出, 短腔绿光输出是由特定周期的尖峰所构成, 随时间波动起伏很大; 随着腔长的增大, 尖峰消失, 输出波动趋于平稳。

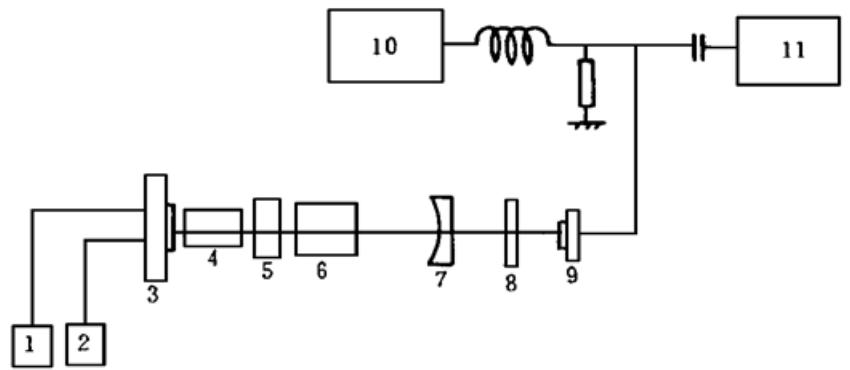


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

- 1. power supply of LD, 2. temperature controller, 3. LD, 4. focus lens, 5. Nd·YVO₄, 6. KTP, 7. Output mirror (R= 100 mm), 8. Attenuator, 9. Detector, 10. Voltmeter, 11. Spectral analyzer

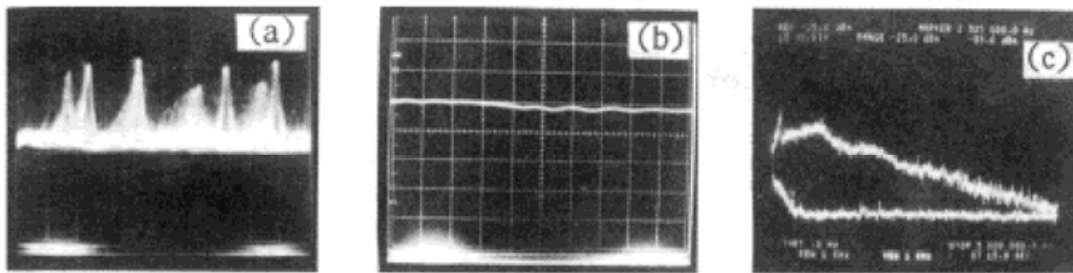


Fig. 2 (a) Green output vs time for $L = 1$ cm ($2 \mu\text{s}/\text{div}$, $5 \text{mv}/\text{div}$), (b) Green output vs time for $L = 10$ cm ($10 \mu\text{s}/\text{div}$, $5 \text{mv}/\text{div}$), the datum lines are both the line that is below the middle line, (c) Spectrum distribution of green noise for $L = 1$ cm and 10 cm respectively ($10 \text{dB}/\text{div}$). The upper curve is corresponding to $L = 1$ cm, range of frequency is 0~ 5 MHz; The bottom curve is corresponding to $L = 10$ cm, range of frequency is 0~ 1 MHz

图 2(c) 是在保持绿光输出功率不变(5mW) 时测得的短腔(1cm) 和长腔(10cm) 情况下

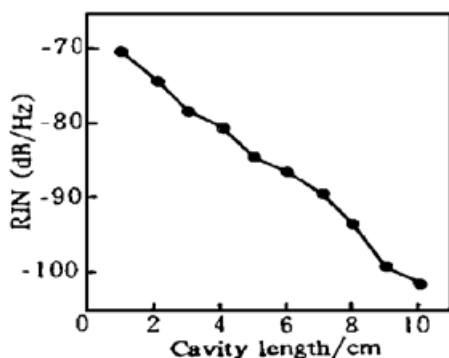


Fig. 3 RIN of green output vs cavity length at 100 kHz

绿光噪声的频谱分布图。上部曲线是短腔(1 cm) 情况, 频率范围 0~ 5 MHz; 下部曲线是长腔(10 cm) 情况, 频率范围 0~ 1 MHz。从图 2(c) 可见, 长腔绿光噪声显著小于短腔情况。图 3 是频率在 100 kHz 处, 绿光相对强度噪声(RIN) 随腔长的变化图, 从图 3 可以看出, 在 100 kHz 处, 长腔(10 cm) 绿光相对强度噪声比短腔(1 cm) 绿光相对强度噪声减小了 31 dB。另外, 长腔(10 cm) 绿光相对强度噪声随频率升高逐渐降低, 在 120 kHz 处降至- 110 dB/Hz(本实验装置所能测的最低相对强度噪声值); 而短腔(1 cm) 绿光相对强度噪声在 0~ 900 kHz 范围内随频率升高略有升高, 大于 900 kHz 后随频率升高逐渐降低, 直到 5.3 MHz 才降至- 110 dB/Hz。对比可知, 短腔

(1 cm) 绿光相对强度噪声大于- 110 dB/Hz 的频率范围是长腔(10 cm) 绿光相对强度噪声大于- 110 dB/Hz 频率范围的 44.2 倍。

2.2 绿光噪声和泵浦功率的关系

为了测试绿光噪声和泵浦功率的变化关系, 实验中使用了一连续可调的衰减器, 以保证入射到探测器上的绿光功率不变, 即保持电平表指数不变。图 4 是在固定腔长为 2 cm, 泵浦功率分别为 160 mW 和 320 mW 时, 输出绿光噪声的频谱分布, 频率范围 0~ 2 MHz(实验观察到, 纵模数保持 2 个不变), 上部曲线和下部曲线分别对应 320 mW 和 160 mW 的泵浦功率。由图 4 可看出, 在 0~ 650 kHz 频率范围内, 随泵浦功率增大, 绿光噪声只略有增加, 当频率大于 650 kHz 时, 绿光噪声增加变得十分明显。图 5 是在腔长为 2 cm 时, 1.5 MHz 处的绿光相对强度噪声随泵浦功率的实测数据。由图可见, 当泵浦功率从 160 mW 增至 320 mW 时, 相对强度噪声增加了 20 dB。

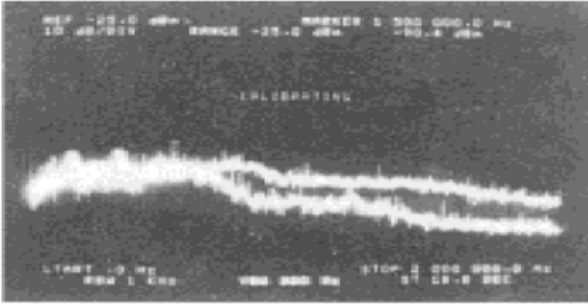


Fig. 4 Spectrum distribution of green noise (10 dB/div). Range of frequency is 0~ 2 MHz. The upper and bottom curves are corresponding to the pump power of 320 mW and 160 mW respectively

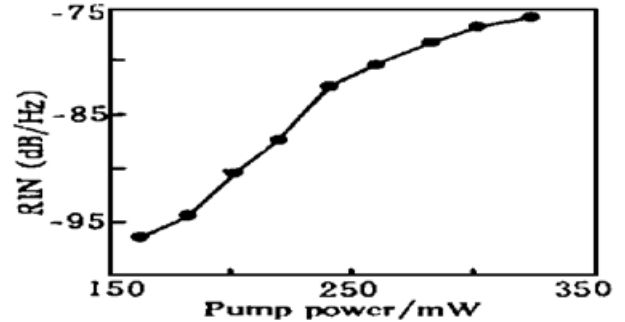


Fig. 5 RIN of green output vs pump power at 1.5 MHz

3 理论分析

Nd:YVO₄ 激光晶体的受激辐射具有很强的各向异性, 对 Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频激光器, 其包含 N 个纵模的多纵模激光振荡可用下面的耦合微分方程组描述^[1, 3, 4, 6]:

$$\tau_c \frac{dI_i}{dt} = (G_i - \alpha_i - g\epsilon I_i - 2\epsilon \sum_{j \neq i}^N \mu_j I_j) I_i \quad (1a)$$

$$\tau_f \frac{dG_i}{dt} = G_i^0 - G_i(1 + \beta_i I_i + \sum_{j \neq i}^N \beta_{ij} I_j), \quad i = 1 \sim N \quad (1b)$$

式中 I_i 为第 i 个纵模的强度, G_i 为第 i 个纵模的增益, τ_c 为光子在腔内的往返时间($\tau_c = 2L/c$, L 为腔长); τ_f 为荧光寿命(对 YVO₄, $\tau_f = 0.09$ ms), α_i 为第 i 个纵模的损耗(均取 0.015), ϵ 为非线性耦合系数(典型值这 5×10^{-5}), β_i 为第 i 个纵模的饱和参数, β_{ij} 为交叉饱和参数, G_i^0 为第 i 个纵模的小信号增益, g , μ_j 为描述激光偏振特性的几何参数, 对于 Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频激光器, 取 $\mu_j = g = 1$ ^[4]。

二次谐波输出强度用下面公式计算^[3]:

$$I_{SHG} = \epsilon \left[\sum_{i=1}^N I_i^2 + 4 \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}}^N I_i I_j \right] \quad (2)$$

3.1 绿光输出波形和腔长的关系

下面以短腔(1 cm)和长腔(10 cm)为例, 分别计算其绿光输出波形。

3.1.1 短腔情况

各参数取值(两个纵模): $\tau_c = 0.67 \times 10^{-10}$ s, $\beta_1 = \beta_2 = 1.0/W$, $\beta_{12} = \beta_{21} = 0.66/W$, $G_1^0 = 0.10$, $G_2^0 = 0.09$ 。

用四阶龙格-库塔方法解耦合微分方程组, 可得图 6(a) 所示的绿光输出波形图。

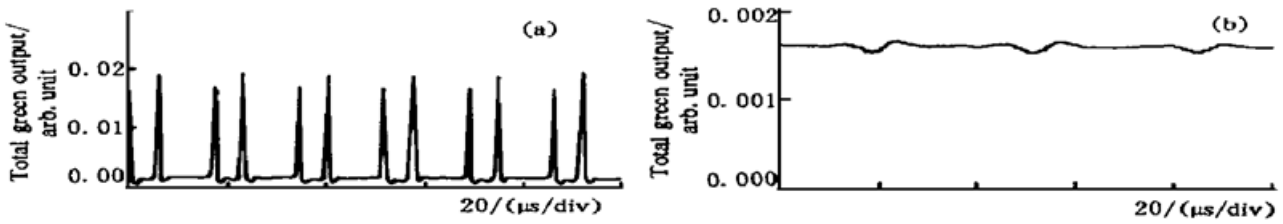


Fig. 6 (a) Waveform of green output for $L = 1$ cm, (b) Waveform of green output for $L = 10$ cm

3.1.2 长腔情况

对于腔长等于 10 cm 情况, $\tau_c = 0.67 \times 10^{-9}$ s, 可以有 10 个纵模起振^[8]。在固定泵浦功率的情况下, 随着纵模数增加, 单个纵模的增益减小, 但每个纵模并非同时到达最大值, 因此每个纵模的增益并不会随着纵模数的增加而成比例减小。计算中, 取第一个纵模的增益为 0.06, 其余纵模增益依次递减 0.0002; 第一个纵模的饱和参数 β_1 仍取 $1.0/W$, 其余各纵模饱和参数依次递减 $0.02/W$; 为计算方便, 交叉饱和参数 β_{ij} 均取为 $0.66/W$ 。由此可算得绿光输出波形, 如图 6(b) 所示。从图 6(a)、6(b) 的对比可看出, 短腔情况下倍频输出包含特定周期的尖峰结构, 波形相对起伏较大, 而在长腔情况下, 倍频输出波形比较平滑, 无尖峰结构, 相对起伏较小。从计算过程可知, 对于腔长的变化, 主要有两个方面的因素对绿光输出的稳定性起作用: 1) τ_c 的变化。为讨论方便, 将(1a)式改写为:

$$\frac{1}{I_i} \frac{dI_i}{dt} = \frac{1}{\tau_c} (G_i - \alpha_i - \epsilon I_i - 2\epsilon \sum_{j \neq i}^N I_j) \quad (3)$$

从(3)式可看出, 等号左边项代表第 i 个纵模强度随时间的相对变化。随着腔长的增大, τ_c 增大, 右边项的绝对值减小, 所以使纵模强度随时间的相对变化减小; 2) 随着腔长的增大, 纵模数增多, 在泵浦功率不变的情况下, 单个纵模增益减小, 即(1b)式右边第一项 G_i^0 减小, 同时, 随着纵模数增多, 交叉饱和变得十分有效^[5], 这集中反映在(1b)式中包含 β_{ij} 的负项上, 一个纵模受到更多的其它纵模的饱和作用, 使其增益随时间的变化减小, 从而使纵模强度随时间的变化减小。从傅里叶变换可知, 波动越尖锐, 其包含的高频成分越多, 亦即长腔情况下倍频输出的高频率噪声将远小于短腔情况。这些计算结果与图 2 的实验结果相一致。

3.2 绿光输出波形和泵浦功率的关系

在固定腔长的情况下, 随着泵浦功率的提高, 除输出功率增大以外, 绿光噪声也会发生很大的变化。下面以腔长 $L = 2$ cm, 两个纵模起振的情况为例, 分别计算在不同的泵浦功率下, 绿光输出的波形图。

3.2.1 低泵浦功率情况

由于泵浦功率较低, 各纵模增益比较小, 在两个纵模起振情况下, 各参数取值为: $\tau_c = 1.33 \times 10^{-10}$ s, $G_1^0 = 0.018$, $G_2^0 = 0.0179$, 其余参数同 3.1.1 节可计算得如图 7(a) 所示绿光输出的波形图, 单个尖峰时间半宽 $6 \mu\text{s}$ 。

3.2.2 高泵浦功率情况

纵模数保持两个不变, 其增益均增加 2 倍, 即 $G_1^0 = 0.036$, $G_2^0 = 0.0358$ 。其余参数同低功率情况, 经计算得图 7(b) 所示绿光输出的波形图, 单个尖峰时间半宽 $1.2 \mu\text{s}$ 。

对比图 7(a) 和图 7(b) 两图可看出, 随着泵浦功率的增加, 单位时间内输出的尖峰数目增多, 宽度变窄, 倍频输出的相对起伏较大, 这主要是因为: 在固定腔长的情况下, 随着泵浦功

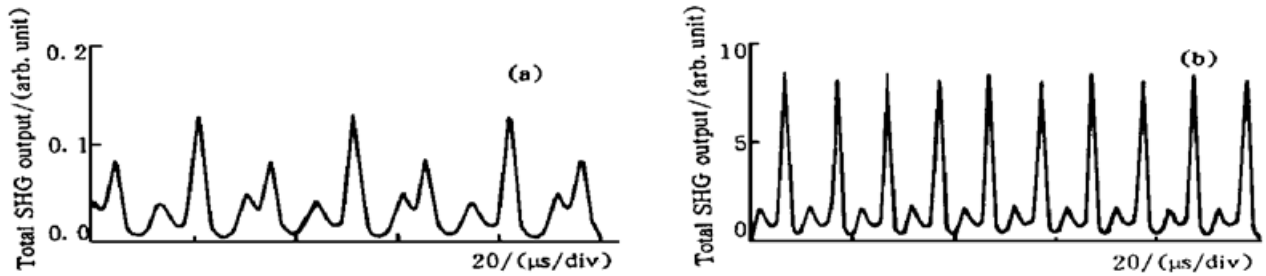


Fig. 7 (a) Waveform of green output at low pump power, (b) Waveform of green output at high pump power. $L = 2$ cm

率的提高, 从(1b)式可看出, 其右边小信号增益 G_0^0 项增大, 使增益随时间的变化增大, 从而使纵模强度随时间变化增大。根据傅里叶变换可知, 高泵浦功率下高频率噪声将增大, 这于图 4 和图 5 的实验结果是一致的。

结 论 基于以上实验结果和理论分析可知: 1) 随着腔长的增大, τ_c 增大, 交叉饱和变得更加有效, 使 Nd·YVO₄/KTP 腔内倍频激光器绿光噪声减小; 2) 随着泵浦功率的增加, 单个纵模增益增大, 使绿光噪声增加。因此, 在设计激光器时要根据需要, 选择合适的腔长及泵浦功率, 以满足对噪声的要求。

参 考 文 献

- [1] T. Baer, Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd·YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **3**(9): 1175~ 1180
- [2] Stephen G. Anderson, DPSS laser seen as argon-ion alternative. *Laser Focus World*, Jan, 1996: 16~ 19
- [3] Glenn E. James, Evans M. Harrell, Rajarshi Roy., Intermittency and chaos in intracavity doubled lasers. *Phys. Rev. (A)*, 1990, **41**(5): 2778~ 2790
- [4] Li Zhenhua, Bao Guojun, Lu Zokang *et al.*, Investigation of "green problem" in a LDA-pumped intracavity-frequency-doubled Nd·YVO₄ laser. *Proc. SPIE*, 1996, **2889**: 234~ 239
- [5] Masahiro Ojima, Akira Arimoto, Naoki Chinone *et al.*, Diode laser noise at video frequencies in optical videodisc players. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(9): 1404~ 1409
- [6] Glenn E. James, Evans M. Harrell, Christopher Bracikowski *et al.*, Elimination of chaos in an intracavity-doubled Nd·YAG laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(20): 1141~ 1143
- [7] D. W. Anthon, D. L. Sipes, T. J. Pier *et al.*, Intracavity doubling of CW diode-pumped NdAG lasers with KTP. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(4): 1148~ 1157
- [8] Larry R. Marshall, Eye doctors look to diode-pumped lasers. *Laser Focus World*, June, 1996: 143~ 150

Study on "Green Problem" of LD-Pumped Intracavity-Doubled Nd·YVO₄/KTP Green Lasers

Lu Jianren Mu Xiaodong Kong Qingyu

Wang Chaangqing Shao Zongshu

(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 29 December 1996; revised 24 February 1997)

Abstract The green noise of Nd·YVO₄/KTP intracavity-doubled green lasers vs cavity length and pump power has been measured. The key factors influencing the green output stability at multilongitudinal modes have been found through theoretical analysis. The calculated result in good agreement with the experiments.

Key words LD, pump, intracavity-doubled, green problem, RIN.