

文章编号 1004-924X(2007)05-0628-05

# 腔内倍频准三能级与四能级激光器噪声特性的比较

李义民<sup>1,2</sup>, 檀慧明<sup>1</sup>, 付喜宏<sup>1,2</sup>, 田玉冰<sup>1,2</sup>, 王保山<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**利用同种激光晶体 Nd:YAG 和同种倍频晶体 LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> (LBO) 分别构成蓝光(473 nm)与绿光(532 nm)激光器并进行了噪声特性研究。分析了腔内倍频准三能级与四能级激光器噪声的不同机理。实验发现:在输出功率为 50 mW 的情况下,腔内倍频准三能级激光系统的倍频光噪声为 120%,比腔内倍频四能级激光器噪声大得多,后者在输出功率为 60 mW 的情况下,激光噪声在 5%以下。针对准三能级倍频激光器的这种特点,采用耦合微分方程组模型进行了分析。结果指出,问题的根源在于准三能级激光系统中具有较大的再吸收损耗,如果能够适当控制该损耗,准三能级激光系统的倍频噪声问题便会得以改善。

**关键词:**腔内倍频激光器;噪声;准三能级;耦合微分方程组;再吸收损耗

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Comparison of noise properties in intracavity-doubling quasi-three-level and four-level solid state lasers

LI Yi-min<sup>1,2</sup>, TAN Hui-ming<sup>1</sup>, FU Xi-hong<sup>1,2</sup>, TIAN Yu-bing<sup>1,2</sup>, WANG Bao-shan<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Based on the different noise mechanisms of the intracavity-doubling quasi-three-level and four-level lasers, the blue(473 nm) and green (532 nm) lasers are made to study their noise characteristics using the same laser crystal (Nd:YAG) and the same doubling crystal(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>). The magnitude of the noise is >120% at output power of 50 mW in a intracavity-doubling quasi-three-level laser, but in a similar intracavity-doubling four-level laser, it is <5% at output power of 60 mW. It is shown that the noise in intracavity-doubling quasi-three-level laser is larger than that in four-level laser system. These properties of high-frequency noise in intracavity-doubling laser have been analysed through coupled-differential equation models and analysis results point out that these properties are caused by the reabsorption losses in quasi-three-level intracavity-doubling laser system. The noise in intracavity-doubling quasi-three-level laser will be decreased if reabsorption losses are controlled.

**Key words:** intracavity-doubling laser; noise; quasi-three-level; coupled-differential equations; reabsorption loss

收稿日期:2006-09-20;修订日期:2007-01-17.

基金项目:863 课题基金资助项目(No. 2002AA311140)

## 1 引言

腔内倍频全固态激光器作为一种实现输出波段极广的有效光源,以其便携、高效、易于操作等诸多优点,实现了在信息存储、彩色打印、彩色显示、水下通讯等方面的广泛应用<sup>[1-3]</sup>。然而,在多纵模工作状态下,当把倍频晶体引入激光谐振腔时,往往会在倍频输出功率中观测到非常大的随时间变化的高频抖动,这大大限制了它在很多领域内的进一步应用,成为制约腔内倍频全固态激光器发展的一个严重问题。

由于此类问题是在通过Ⅱ类相位匹配晶体KTP倍频Nd:YAG中1 064 nm谱线到532 nm绿光中首先被发现的,所以通常也被称作“绿光问题”<sup>[4]</sup>。对于“绿光问题”,1986年美国科学家T. Baer引入了一对耦合微分方程组来进行描述和分析,并且指出该问题的出现是由于激光晶体内的空间烧孔效应与倍频晶体内的和频效应的共同作用引起的,并提出了激光单频运转是解决激光倍频噪声问题的最好方法,同时通过腔内加标准具控制激光频率的个数实现了激光的低噪声运转<sup>[4]</sup>。随后,在倍频激光噪声的机理分析方面,日本学者Oka和Kubota深入分析了偏振模的和频对激光噪声的影响<sup>[5]</sup>。以后,也有人提出了一系列降低激光噪声的方案,但是其基本原理都是基于降低空间烧空效应或者改变基频光的纵模个数或者偏振状态进行的<sup>[6-8]</sup>。对于腔内倍频准三能级激光系统的噪声问题,虽然在Nd:YAG中准三能级946 nm谱线倍频到473 nm蓝光出现不久就被发现,但关于它的机理的探讨却几乎没有相关研究的报道。

本文对腔内倍频四能级和准三能级激光系统输出噪声大小进行了比较。在两个不同的激光器中,使用同种激光晶体以及同种倍频晶体进行实验,结果发现准三能级系统倍频输出的噪声明显地比四能级系统的大得多,这说明造成两者噪声特性差别的根源不在于非线性晶体本身;通过对耦合微分方程模型的分析可以得出,两者的差别在于激光晶体中能级结构不同,与四能级倍频激光系统相比,准三能级系统倍频激光器在耦合微分方程组中引入了再吸收损耗。

## 2 四能级和准三能级激光噪声比较

### 2.1 实验装置

图1为使用同一结构的两种激光器的装置图。在四能级倍频激光器中,采用国产标称功率为2 W的激光二极管(LD)作为泵浦源,经光耦合系统整形圆化后形成半径为100  $\mu\text{m}$ 的光斑注入到掺杂浓度为1.1% (原子数分数),规格为 $\varnothing 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的激光晶体Nd:YAG上,激光晶体左端面镀1 064 nm高反(HR)膜作为谐振腔的一个腔镜,同时该端面对LD发射的808 nm泵浦光增透(AR)以提高利用率;激光晶体右端面则镀制1 064 nm增透膜;输出镜选择曲率半径为50 mm的平凹镜,内侧凹面镀制1 064 nm高反532 nm增透的双色膜,外侧平面镀制532 nm增透膜,整个谐振腔长20 mm。腔内选择尺寸2 mm  $\times$  2 mm  $\times$  5 mm的LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> (LBO)材料按 $\theta=90^\circ$ 及 $\phi=11.4^\circ$ 方向切割作为Ⅰ类相位匹配倍频晶体,其双端面镀制1 064 nm与532 nm增透膜。整个LD部分以及谐振腔的机械装置分别放置在两个热电致冷器(TEC)上进行精密温控。激光工作过程中,倍频532 nm绿光经滤光片滤掉1 064 nm基频光并衰减后,由快速硅光电二极管接收转化为电信号送入到LeCroy9361C型示波器中观察其噪声行为。作为对比,腔内倍频准三能级实验中,选择与上述实验相同的激光晶体Nd:YAG,尺寸为3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  1.5 mm,左侧为对946 nm高反与808 nm增透,同时对1 064 nm增透以抑制四能级1 064 nm振荡,右侧则镀制946 nm增透膜。输出镜选用同样曲率半径的蓝

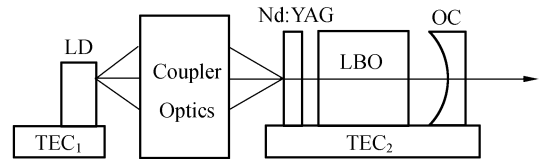


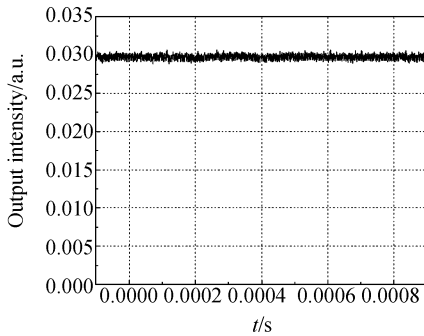
图1 LD泵浦全固态腔内倍频Nd:YAG/LBO激光器(LD:激光二极管 TEC:热电致冷器 OC:光学输出镜)

Fig. 1 Setup of a LD pumped solid-state intracavity-doubling Nd:YAG/LBO laser (LD:laser diode TEC: temperature-electronic controller OC:output coupler)

光平凹镜,凹面镀 1 064 nm 增透、946 nm 高反及 473 nm 增透膜;仍采用 LBO 晶体作为倍频材料,尺寸为 2 mm×2 mm×10 mm,为保证对 946 nm 基频光仍为 I 类相位匹配,切割角度为  $\theta=90^\circ$  及  $\phi=19.4^\circ$ ,该晶体双端镀 946 nm 及 473 nm 增透膜。

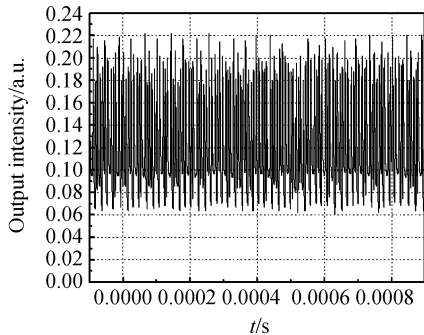
## 2.2 实验结果

在两组对比性的实验中,观察到如图 2 所示的实验结果。图 2(a)为 532 nm 激光在输出功率为 60 mW 情况下的噪声情况。采用 I 类相位匹配晶体 LBO 的四能级倍频激光器噪声其在 5% 以下,具有低噪声运转的特点;然而,在准三能级倍频激光器中,虽然采用与四能级倍频激光器实验完全相同的激光晶体、倍频晶体以及相位匹配类型,但倍频 473 nm 激光输出的噪声比较大。图 2(b)为 473 nm 蓝光在输出功率为 50 mW 情况下的噪声情况,输出功率噪声大于 120%。很明显,腔内倍频准三能级 473 nm 激光噪声要远大于四能级系统 532 nm 激光的噪声。



(a) 四能级倍频 532 nm 激光噪声

(a) Noise in intracavity-doubling four level green laser at 532 nm



(b) 准三能级倍频 473 nm 激光噪声

(b) noise in intracavity-doubling quasi-three-level blue laser at 473 nm

图 2 四能级和准三能级激光噪声比较

Fig. 2 Comparison of laser noise properties

## 3 理论分析及实验验证

腔内倍频四能级 I 类相位匹配 532 nm 激光具有低噪声运转的特性,这已经被北京物理所的李德华通过 Jones 矩阵理论分析指出,其原因在于利用 I 类相位匹配晶体的情况下完全克服了偏振模之间的耦合,使得倍频光输出功率噪声大大降低<sup>[9]</sup>。

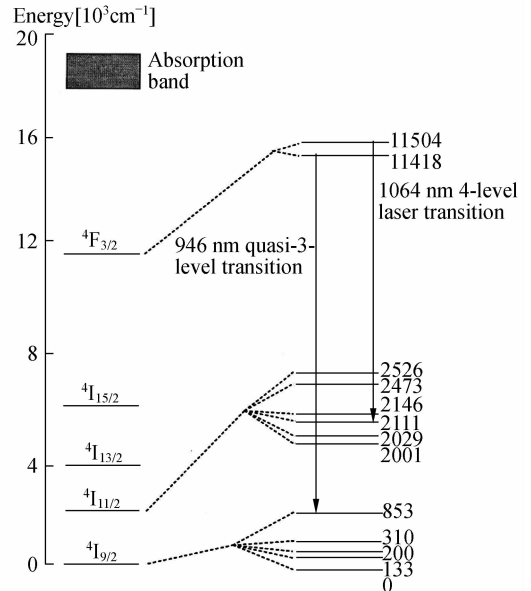


图 3 Nd:YAG 晶体能级结构

Fig. 3 Level diagram for Nd:YAG crystal

在准三能级倍频 473 nm 激光器中,使用同样的激光晶体 Nd:YAG,并且倍频晶体的相位匹配类型和选用材料也都完全相同,不同的倍频晶体长度仅仅会导致倍频的效率不同,不会影响激光运转是否具有低噪声特性,但实验中却出现了很大的激光噪声。两种激光器唯一的差别仅仅在于激光晶体利用了具有不同能级结构的发射谱线。图 3 为 Nd:YAG 能级分布及各发射谱线所对应的能级跃迁。绿光 532 nm 利用的是 Nd:YAG 晶体中发射波长为 1 064 nm 的  $4F_{3/2} - 4I_{11/2}$  四能级结构谱线,而蓝光 473 nm 激光器利用的则是 Nd:YAG 晶体中发射波长为 946 nm 的  $4F_{3/2} - 4I_{9/2}$  准三能级结构谱线。

引入耦合微分方程组对上述两种激光系统进行分析<sup>[4]</sup>。该方程组是通过描述激光器中激光模式强度  $I_k$  和增益  $G_k$  随时间变化来反映激光行为

的动力学方程组:

$$\tau_c \frac{dI_k}{dt} = [G_k - \alpha_k - g\epsilon I_k - 2\epsilon \sum_{j \neq k} \mu_{jk} I_j] I_k, \quad (1)$$

$$\tau_f \frac{dG_k}{dt} = \gamma - [1 + I_k + \beta \sum_j I_j] G_k. \quad (2)$$

其中  $k=1, \dots, N$  代表激光的模式个数,  $\tau_c$  为光子 在光腔内的往返时间,  $\tau_f$  代表  $\text{Nd}^{3+}$  粒子的荧光 寿命,  $\alpha_k$  为激光模的损耗参数,  $\gamma$  为小信号增益,  $g$  代表与激光晶体和倍频晶体有关的几何因子。该 方程组最初是针对腔内 II 类相位匹配倍频四能级 激光系统而提出的, 同样也适用于本文腔内 I 类 相位匹配倍频情况, 只需相应调整一下相位因子  $g$  即可<sup>[10]</sup>。方程组中的各个物理参数在本文两 组实验中, 除损耗参数存在差别外, 其它完全相 同。在准三能级激光器中, 损耗参数除了应考虑 输出镜损耗因素以及腔内线性损耗因素(例如吸 收、散射等)外, 还应当考虑在准三能级结构中由 于激光下能级粒子数不为零而导致的再吸收损耗 因素<sup>[11]</sup>。从耦合微分方程组可以看出, 与四能级 倍频激光系统相比, 准三能级倍频激光系统仅仅 在于在损耗参数中再附加了一个再吸收损耗项, 这是与四能级系统唯一的差别, 因此它的存在是 不能被忽视的, 而它在耦合微分方程组的出现必 然导致腔内倍频准三能级激光噪声行为与四能级 倍频激光系统有所差别。因此有必要考察在腔内 倍频准三能级激光器中再吸收损耗是如何影响其 输出噪声的。

准三能级激光系统模型中再吸收损耗的大小 由表达式

$$\delta_{\text{rea}} = \sigma f_l N_{\text{ion}} L I_{\text{sat}} \ln(1 + 2I/I_{\text{sat}}) / I, \quad (3)$$

定量给出<sup>[11]</sup>, 这里  $\sigma$  为激光谱线的受激发射截 面,  $f_l$  为激光下能级的布居百分比,  $N_{\text{ion}}$  为激光晶 体的掺杂浓度,  $L$  为激光晶体长度,  $I$  为激光谐振 腔内基频光的循环强度,  $I_{\text{sat}}$  为腔内基频光饱和和光 强, 它通过表达式  $I_{\text{sat}} = h\nu / [(f_l + f_u)\sigma\tau]$  给出, 其中  $h\nu$  为基频光光子能量,  $f_u$  为激光上能级布居 百分比。对同样具有准三能级特性的激光晶体, 通过表达式可以看出, 要改变激光系统的再吸收 损耗可以通过多种途径来实现, 例如通过改变晶 体的长度、降低激光晶体的掺杂浓度或者降低激 光晶体的温度以影响激光下能级的粒子数布居 百分比等等。为了操作简便, 这里通过改变激光谐 振腔内基频光的循环强度就会相应地改变再吸收

损耗大小的方式, 由此来考察再吸收损耗的变化 对腔内倍频准三能级激光器噪声大小的影响。

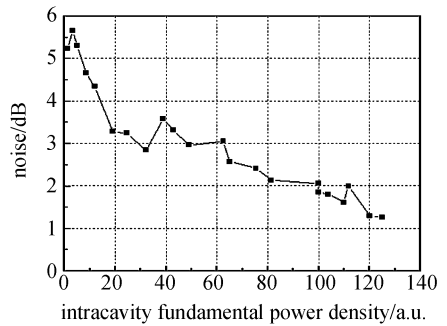


图4 腔内倍频准三能级激光器输出噪声大小与腔 内基频光循环强度的关系

Fig. 4 Magnitude of output noise measured versus the intracavity fundamental power density for 473 nm blue laser

在前述腔内倍频准三能级激光器中, 在保持 泵浦光斑大小不变的情况下, 通过改变泵浦功率 实现改变激光谐振腔内基频光的循环强度, 得到 如图4所示的输出蓝光473 nm噪声行为实验结 果。实验结果表明, 通过改变激光器的泵浦功率, 腔内基频光的循环强度在变大的同时, 在总体趋 势上准三能级倍频输出噪声具有减小的趋势。对 于该激光器, 由式(3)可知, 在改变泵浦功率过程 中, 其它物理量均未发生变化, 再吸收损耗的变化 仅仅受到腔内基频光循环强度的影响, 所以实验 结果也相当于间接表明腔内倍频准三能级激光噪 声在总体上具有随再吸收损耗减小而减小的趋 势。

## 4 结 论

为了分析腔内倍频准三能级与四能级激光 器噪声的不同机理, 本文对比了利用同种激光晶 体  $\text{Nd}:\text{YAG}$  和同种倍频晶体  $\text{LBO}$  的腔内倍频 准三能级和四能级激光器的噪声差别, 波长为 532 nm 的倍频四能级激光器输出功率为60 mW 时, 其输出噪声小于5%; 而波长为473 nm 的倍 频准三能级激光器在输出功率为50 mW 情况下, 输出噪声则大于120%。通过耦合速率方程模型 分析指出, 这一差别在于准三能级激光器的工作 机理不同于四能级腔内倍频激光器。在腔内倍频

准三能级激光器中存在再吸收损耗,如对这一损耗进行适当控制,腔内倍频准三能级激光器的噪声将大大降低。

### 参考文献:

- [1] 郝二娟,檀慧明,李特. LD 端面泵浦的高输出单频 Nd:YO<sub>3</sub> 绿光激光器[J]. 光学精密工程,2006,14(4):580-583.  
HAO E J, TAN H M, LI T. High output and single-frequency ring Nd:YO<sub>3</sub> laser end-pumped by diode laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):580-583. (in Chinese)
- [2] 中高,檀慧明,刘飞. 全固态 355nm 连续紫外激光器的优化设计[J]. 光学精密工程,2006,14(5):731-735.  
SHEN G, TAN H M, LIU F. Optimization design for all-solid-state 355nm continuous-wave ultraviolet laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):731-735. (in Chinese)
- [3] 张岳,郝丽,柳华,等. 激光显示的原理与实现[J]. 光学精密工程,2006,14(3):402-405.  
ZHANG Y, HAO L, LIU H, et al.. Principle and realization of laser display technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):402-405. (in Chinese)
- [4] BAER T. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986,3(9):1175-1180.
- [5] OKA M, KUBOTA S. Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode-pumped Nd:YAG lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1988,13(10):805-807.
- [6] USTYUGOV V I, ORLOY O A, KHALEEY M M, et al.. Self-stabilization of a continuous wave multimode green laser due to antiphase dynamics[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997,71(2):154-156.
- [7] GAEBLER V, LIU B, EICHLER H J, et al.. Efficient blue cw Nd:YAG microchip laser with two intracavity frequency doublers[J]. *Opt. Lett.*, 2000,25(18):1343-1345.
- [8] CZERANOWSKY C, BAEV V, HUBER G. Stabilization of intracavity frequency-doubled lasers with type I phase matching[J]. *Opt. Lett.*, 2003,28(21):2100-2102.
- [9] LI D H, ZHU CH H, GAEBLER V, et al.. Theoretical and experimental studies of noise suppression for intracavity frequency doubled lasers with phase matching type I or II[J]. *Opt. Commun.*, 2001,189(4-6):357-364.
- [10] JAMES G E, HARRELL E M, ROY R. Intermittency and chaos in intracavity doubled lasers[J]. II, *Phys. Rev. A*, 1990,41(5):2778-2790.
- [11] FAN T Y. Single-axial mode, intracavity doubled Nd:YAG laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991,27(9):2091-2093.

作者简介:李义民(1979—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生,研究方向为全固态激光及光学频率变换技术。E-mail:lym79hsd@163.com