

# LDA抽运腔内LBO和频激光器噪声特性分析

杨建明<sup>1,2,3</sup> 檀慧明<sup>1,2\*</sup> 高 静<sup>1</sup> 田玉冰<sup>1</sup> 姚文明<sup>1</sup> 张 龙<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 实验采用激光二极管阵列(LDA)端面抽运Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,腔内产生1064 nm和1342 nm双波长振荡,通过非线性晶体LBO的I类相位匹配产生连续输出的593.5 nm和频光。在不同的实验条件下,测量并分析了噪声特性,并用法布里-珀罗干涉仪和光束轮廓仪分别测量了593.5 nm激光在低噪声与高噪声状态下的纵模结构与横模模式。结果表明:I类相位匹配的和频光噪声情况与其纵模结构密切相关,而抽运功率和谐振腔微调对和频光的纵模结构有很大影响。激光输出在多纵模结构不稳定时的噪声要高于多纵模结构稳定时的噪声。并且激光输出为高阶横模模式时,也会引起激光噪声的增大。

**关键词** 激光器;腔内和频;I类相位匹配;噪声特性

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1002003

## Noise Characteristics of LDA Pumped Laser by Intracavity Sum-Frequency Generation with LBO

Yang Jianming<sup>1,2,3</sup> Tan Huiming<sup>1,2</sup> Gao Jing<sup>1</sup> Tian Yubing<sup>1</sup> Yao Wenming<sup>1</sup> Zhang Long<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academic of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

<sup>2</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

**Abstract** The fundamental wavelengths are oscillated at 1064 nm and 1342 nm in a diode array pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser. Continuous wave (CW) sum frequency generation (SFG) of 593.5 nm is achieved by placing the nonlinear optical crystal LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> (LBO) cut as type-I phase matched in the cavity. Noise characteristics of CW intracavity SFG laser is measured and analyzed in different experiment conditions. The multi-longitudinal modes structure and transverse modes pattern of SFG laser is observed in high and low noise operation by Fabry-Perot (F-P) scanning interferometer and beam profile instrument, respectively. The results show that noise characteristics of SFG laser is closely related to the multi-longitudinal modes structure which is associated with the pumping power and the resonator cavity perturbation. Compared with unstable multi-longitudinal modes structure, the output laser with stable multi-longitudinal modes structure is lower noise operating. In addition, higher-order transverse modes pattern can also cause the increase of laser noise.

**Key words** lasers; intracavity sum-frequency generation; type-I phase matching; noise characteristics

**OCIS codes** 140.1540; 190.3100; 190.4223

收稿日期: 2015-03-27; 收到修改稿日期: 2015-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(61405236)、苏州市应用基础研究计划(SYG201208, SYG201305)、苏州市技术专项(ZXG201133, ZXY2012014)、江苏省自然科学基金面上项目(BK20131170)、江苏省产学研项目(BY2013033)

作者简介: 杨建明(1988—),男,硕士研究生,主要从事非线性光学频率变换技术方面的研究。E-mail: yjmlaser@163.com

导师简介: 檀慧明(1954—),男,研究员,博士生导师,主要从事全固态激光与非线性光学频率变换技术方面的研究。

E-mail: tanhm@ciomp.ac.cn(通信联系人)

## 1 引言

激光器的噪声特性是衡量其性能的重要指标,激光分析仪器、激光雷达、彩色印刷等应用对使用激光器噪声的频率和幅度都有较严格的技术要求。因此,激光器中的噪声特性一直是科学工作者的关注对象<sup>[1-3]</sup>。

目前国内外已经对全固态腔内倍频激光器的噪声特性进行了大量的理论与实验研究,并得到了相应的解决方案。比如 Baer 等<sup>[4]</sup>以 LD 抽运 Nd:YAG 腔内倍频作为实验模型,提出噪声特性与纵模数相关,倍频光在基频光为单纵模时噪声可以有效降低。Oka 等<sup>[5]</sup>以 LD 抽运 Nd:YAG 以及倍频晶体为 KTP II 类相位匹配为实验模型,在腔内加入基频光的  $\lambda/4$  波片后,建立基频光往返的琼斯矩阵,验证了倍频过程中的两种偏振模式的交叉和频也是使激光噪声变大的因素之一。James 等<sup>[6]</sup>以 LD 抽运 Nd:YAG 以及倍频晶体 KTP 为实验模型,先通过腔型结构构建琼斯矩阵,根据激光晶体和倍频晶体对基频光的相位延迟与两晶体的方位角三者之间的关系,得出通过调节方位角可以有效降低噪声这一结论。

与全固态腔内倍频激光器噪声的研究相比较,有关腔内和频激光器噪声特性的实验与理论研究较少。吕彦飞等<sup>[7]</sup>用阵列 LD 抽运 Nd:YAG 晶体,采用三镜折叠腔内 I 类相位匹配 LBO 和频获得低噪声 589 nm 激光,提出低噪声产生原因是参与和频的两基频光具有相同的偏振方向,由于没有不同偏振模之间的和频耦合,所以能在低噪声状态工作。高兰兰等<sup>[8]</sup>采用直腔结构,用单管 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,II 类相位匹配 KTP 和频产生 593.5 nm 激光,并分析了噪声大小与纵模结构的关系。付喜宏等<sup>[9]</sup>采用直腔结构,用单管 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,LBO I 类相位匹配,在标准具的选频作用下,得到单纵模低噪声 593.5 nm 和频光。

实际上,具有与文献[7]类似的多纵模的 I 类相位匹配腔内和频激光器,虽然没有偏振模之间的交叉耦合,但相同偏振态的纵模之间的交叉和频以及多横模的不同横模之间耦合也会引起噪声。采用直腔结构,激光二极管(LDA)抽运单块具有偏振发射特性的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,通过对输出镜适当镀膜,实现了 1064 nm 与 1342 nm 双波长振荡后,通过非线性晶体 LBO 的 I 类相位匹配产生连续和频光 593.5 nm。测量噪声实验中,观察到了与文献[7]类似的低噪声的现象,但在不同的实验条件下,虽然没有偏振模之间的耦合,也观察到了与文献[8]类似的较高噪声,并用法布里-珀罗(F-P)干涉仪和光束轮廓仪分别测量了 593.5 nm 激光在低噪声与高噪声的状态下的纵模与横模结构,探讨了产生噪声的原理。

## 2 实验方案

实验装置如图 1 所示,抽运源采用中心波长为 808 nm 的 LDA,所发出的光经过光纤耦合至准直聚焦镜( $f_1=10$  mm, $f_2=20$  mm),聚焦为半径 200 mm 的光斑注入到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体。激光晶体 Nd:YVO<sub>4</sub>(3 mm×3 mm×5 mm)的掺杂原子数分数为 0.5%,左端面镀对 1064 nm 和 1342 nm 的高反(HR)(反射率  $R > 99.9\%$ )、对 808 nm 减反(AR)膜作为谐振腔的平面输入镜,右端面镀膜对 1064 nm 和 1342 nm 的高透(HT)膜(透射率  $T > 99.9\%$ )以减少两基频光在腔内的损耗。输出镜为曲率半径 200 mm 的平凹镜,凹面所镀膜系为对 1064 nm 和 1342 nm 高反、对 593.5 nm 减反,平面对 593.5 nm 增透的膜。和频晶体 LBO(2 mm×2 mm×10 mm)按照对 1064 nm 与 1342 nm I 类相位匹配的和频方向切割( $\theta=90^\circ$ , $\varphi=2.5^\circ$ ),两端镀对 1064 nm、1342 nm 和 593.5 nm 的减反膜。谐振腔整体固定在制冷器(TEC)上,通过热敏电阻负反馈控制谐振腔的温度,温控精度为 0.1 °C。谐振腔光学腔长为 55 mm,用滤光片滤掉红外光,经过衰减后用光电探测器(PDA10A, Thorlabs)与示波器(TDS2000C, Tektronix)测量 593.5 nm 噪声。纵模结构由平平腔的 F-P 扫描干涉仪扫描后用光电探测器接收光信号通过示波器进行观察。

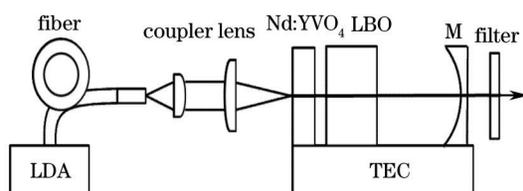


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 谐振腔输出镜微调对噪声的影响

在激光噪声测量实验中,发现谐振腔输出镜位置不同时虽然都获得了谐振,但也会引起较大的激光输出噪声信号变化。图2中(a)和(c)为激光器在相同抽运功率下,输出镜不同位置所得到的激光输出噪声信号,图2(b)和(d)为其所对应的傅里叶变换频谱图。图2(a)表明了在高噪声激光输出状态,输出信号表现一系列有规律的能量峰,其均方根(RMS)值噪声为15.9%,噪声周期约为10.5  $\mu\text{s}$ ,与文献[8]中采用KTP II类相位匹配和频的噪声周期比较相近。从图2(b)中可以看出,相对强度最高的噪声频率在95 kHz,与示波器显示的噪声周期相对应,称之为基波。但在190 kHz左右,出现了相对强度噪声(RIN)高达-89 dB/Hz的频率峰,对于这一峰值的出现,可以看出光噪声信号并不是纯正的正弦波,还含有较高成分的2次谐波。此时,在抽运功率保持不变的情况下,微调输出镜,也得到了与文献[7]类似的低噪声输出,如图2(c)所示,RMS值噪声为1.3%,从频谱图2(d)中可以看出,20 kHz以上频段,没有出现明显的频率峰,可以将此低噪声成分全部理解为随机噪声。

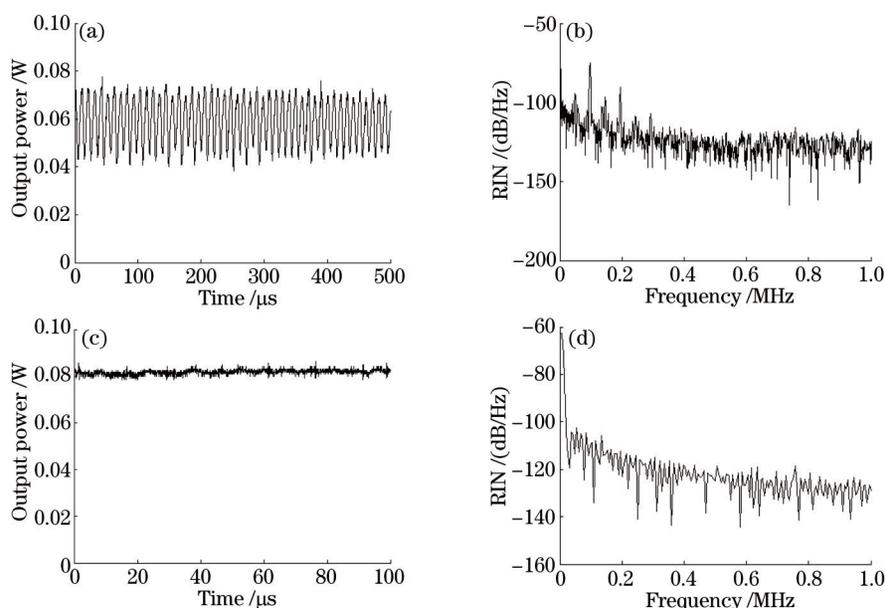


图2 (a)、(c) 抽运功率为3 W时在不同输出镜位置获得的激光输出信号以及(b)、(d)对应的频谱

Fig.2 (a), (c) Oscilloscope traces of laser output at 3W pumped power with different output mirror positions and (b), (d) frequency spectra of laser output corresponded with (a) and (c)

本实验表明了,在多纵模的I类相位匹配的腔内和频过程中,虽然没有偏振模之间的交叉耦合,但相同偏振态的纵模之间的交叉和频以及多横模的不同横模之间耦合也会引起噪声。同时通过微调激光谐振腔的腔镜,改变了激光的纵模或横模结构后,也会敏感地改变激光器的输出噪声特性。在3.3部分将对此进行较为详细的讨论。

#### 3.2 抽运光功率对噪声的影响

图3(a)和(c)为激光器在谐振腔结构以及腔镜位置固定时,不同抽运功率下所得到的输出信号,图3(b)和(d)为其所对应的相对强度噪声<sup>[10]</sup>。图3(a)为在3.2 W抽运功率下获得的低噪声激光输出,RMS值噪声为1.6%。图3(c)中的抽运功率为4 W,激光输出为高噪声状态,RMS值噪声为7.8%,输出信号的波形与图2(a)相似,噪声周期相比输出功率偏低时的10.5  $\mu\text{s}$ 有所减小,约为9  $\mu\text{s}$ ,而此时从图3(d)的频谱图可以看出20 kHz以上的频段中只出现了基波的频率峰。在此基础上抽运功率继续增大时,和频橙黄光逐渐减弱,直至出现光强很弱的532 nm绿光,重新调整LBO角度,即可恢复593.5 nm的和频橙黄光输出。这一实验结果表明了采用LBO的I类相位匹配在改变抽运功率时,也存在与文献[8]采用KTP的II类相位匹配和频类似的双稳态现象。该文献在增加抽运和降低抽运电流时,也获得了不同的和频光输出功率。早期采用LBO的I类相位匹配的腔内倍频激光器的研究中,也有文章报道了类似的现象<sup>[11]</sup>。从实验中可以看出,即使激光器输出功率

较高的时候,仍然可以获得低噪声输出,这与文献[9]的结果不一样,可能是由于谐振腔的腔长不同所致,本实验中采用的直腔腔长为文献[9]的2.5倍,激光晶体高于阈值的增益曲线含有较多的纵模起振,并且较多的纵模对增益的竞争比较平均,没有一个纵模能够达到足够高的增益而使其他纵模产生非线性损耗,进而使激光器低噪声输出<sup>[12]</sup>。同时,由于没有偏振模之间的耦合,也降低了出现噪声的可能性。

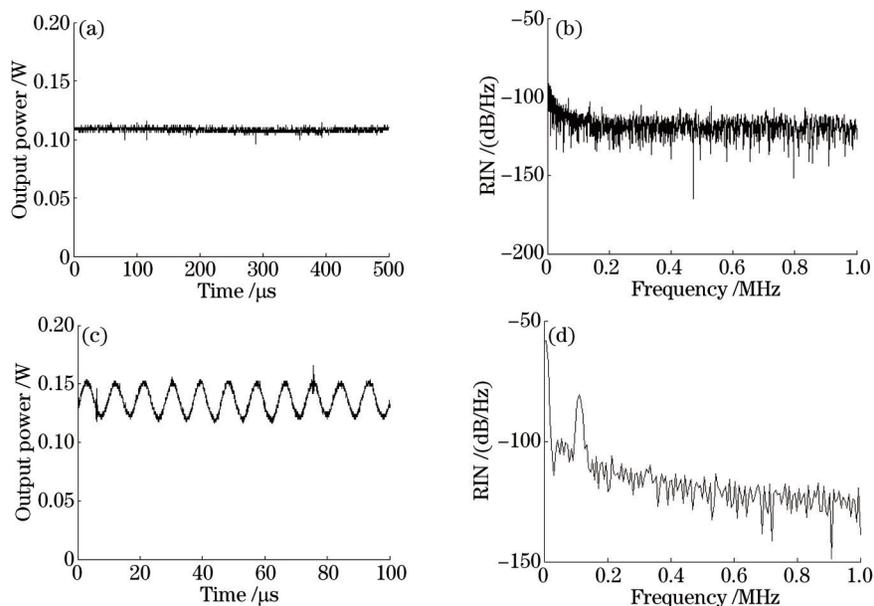


图3 抽运功率分别为 (a) 3.2 W 和 (c) 4 W 的输出信号以及 (b), (d) 对应的相对强度噪声

Fig.3 Oscilloscope traces of laser output at (a) 3.2 W and (c) 4 W pumped power and (b), (d) corresponded frequency spectrum of laser output

### 3.3 激光纵模结构的稳定性对噪声的影响

对于I类位相匹配的多纵模腔内倍频激光器,倍频光的输出如(1)式所示<sup>[13]</sup>,式中  $d_{\text{eff}}$  为有效非线性系数,  $I$  和  $J$  分别代表两个正交偏振的基频光模式,模式数分别为  $M, N$ , 参数  $g$  的值由具有双折射性质的激光晶体和倍频晶体的快轴方位角及其对基频光的相位延迟所决定。从倍频光的输出(1)式<sup>[8]</sup>可以看出,当基频光只存在一种偏振分量  $I$  时(即  $g=g_2=0$ ), 倍频过程是由相同纵模的自倍频和不同纵模之间的和频组成。根据谐振腔的驻波场特性,两相邻纵模的和频效率随着倍频晶体在腔内位置的不同而不同。若倍频晶体在谐振腔的端面附近,两相邻纵模的驻波强度的波峰重合度较高,所以有较高的和频效率,不同的纵模之间的和频使这两个模产生耦合,互相影响,使得每个纵模在激光晶体中产生的增益也不同,这种变化产生振荡后在激光晶体内增益放大,激光将以噪声状态输出。文献[14]在腔内倍频激光器噪声抑制技术的研究中将倍频晶体放到激光谐振腔的中心位置,两模式的波峰与波谷对应,降低了相同波长的不同纵模之间的和频效率,因此抑制了噪声。

$$I_{\text{SHG}(0)} = \frac{d_{\text{eff}}^2}{4} \left[ g_1 \left( \sum_{i=1}^M I_i^2 + 2 \sum_{i \neq j}^{M,M} I_i I_j \right) + 4g \sum_{i,k}^{M,N} I_i J_k + g_2 \left( \sum_{k=1}^N J_k^2 + 2 \sum_{k \neq l}^{N,N} J_k J_l \right) \right], \quad (1)$$

$$I_{\text{SFG}(0)} = d_{\text{eff}}^2 \left[ g_a g_b \sum_{j,p}^{A_1, B_1} I_j J_{1p} + g_a (1-g_b) \sum_{j,q}^{A_1, B_2} I_j J_{2q} + (1-g_a) g_b \sum_{l,p}^{A_2, B_1} I_{2l} J_{1p} + (1-g_a)(1-g_b) \sum_{l,q}^{A_2, B_2} I_{2l} J_{2q} \right]. \quad (2)$$

应用琼斯矩阵方法,推导出I类相位匹配和频光的输出如(2)式所示。式中  $I_{1j}, I_{2l}$  为基频光  $a$  的两正交偏振分量,  $J_{1p}, J_{2q}$  为基频光  $b$  的两正交偏振分量,参数  $g_a, g_b$  的值由激光晶体与和频晶体的快轴方位角及其对基频光  $a, b$  的相位延迟所决定。若考虑 Nd:YVO<sub>4</sub> 的线偏振激发特性,经过计算可得  $g_a=1, g_b=0$ , 因此(2)式中的4个交叉项只会留有一项。与腔内倍频激光器不同,对于I类相位匹配的多纵模腔内和频激光器,同一基频光的不同纵模之间本身没有耦合,多纵模和频光的产生是由同一基频光的不同纵模同时与另一基频光的不同纵模交叉和频产生间接的耦合,这种耦合与倍频激光器的纵模之间的和频耦合相比要弱得多。因为两基频光的波长相差较多,在和频晶体的长度范围内包含多个两基频光波长的公倍长度,所以无论和频晶体位于

腔内哪个位置,两基频光形成的驻波场强度波峰都不会出现高度重合或分离,而对于每个纵模,两基频光的不同纵模之间的交叉和频效率可以认为是均匀的,增益的变化也不大。因此与相同结构和参数的倍频激光器相比较,更容易获得低噪声的激光输出。图4(a)为用自由光谱范围为20 GHz的F-P扫描干涉仪在激光输出为低噪声时的扫描结果,根据实际数据计算得到的纵模间隔为2.8 GHz,与理论上由腔长计算得到的纵模间隔(2.7 GHz)相吻合。图4(a)中所能分辨的纵模数为7个,由于自由光谱范围的限制,实际的纵模总数可能会更多,多纵模结构稳定。

在激光输出高噪声时,不同时刻的多纵模结构如图4(b)所示。和频光各纵模强度起伏不定,根据这一实验现象,1类相位匹配的多纵模腔内和频激光噪声的起源应该是激光介质增益带宽边缘的跳模现象。在谐振腔装调的一些位置,增益带宽边缘的纵模处于抽运阈值的临界处,该纵模在出现和消失之间跳变,引起了比偏振耦合噪声频率更低的噪声,如图4(b)测量的与噪声相关的纵模变化表明了这个噪声的起源。

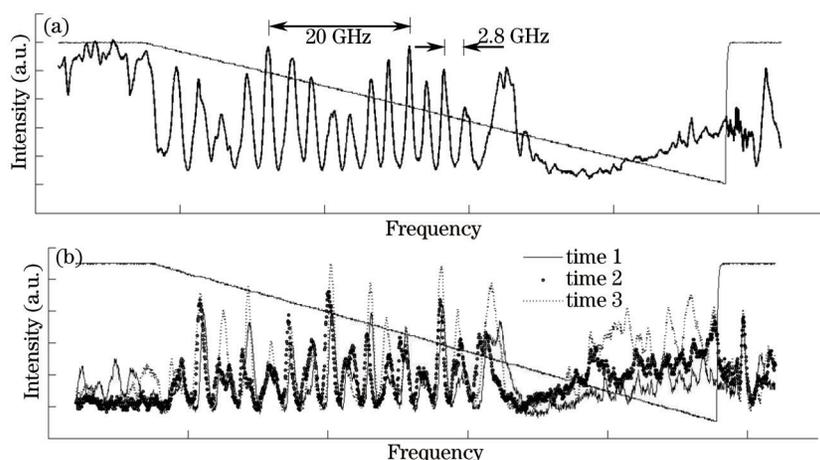


图4 (a) 稳定与 (b) 不稳定的 593.5 nm 多纵模结构

Fig.4 (a) Stable and (b) unstable multi-longitudinal modes structure of 593.5 nm

### 3.4 激光横模模式对噪声的影响

为进一步分析横模模式对噪声的影响,测量了不同横模模式下的噪声。如图5所示,保持抽运功率不变,微调激光器输出镜,激光器横模模式产生变化。根据谐振频率的计算公式<sup>[15]</sup>可得相邻横模谐振频率间隔约为纵模的17%,如果干涉仪的分辨率足够高,可以根据从属于同一纵模序数的相邻谱线的频率差来判断可能包含的横模数<sup>[16]</sup>,但实验所用的干涉仪其分辨率无法将横模成分分辨出来。激光输出横模模式为图5(a)时,激光光束中TEM<sub>00</sub>模的光强度远大于其他高阶横模,此时RMS值噪声为1.9%。激光输出横模模式为图5(b)时,高阶横模的光强度占总光强的比例较图5(a)有所增加,光束质量较差,RMS值噪声为5.9%,高阶横模模式存在多简并态的竞争,导致各横模模式的光强不稳定,激光输出的噪声变大<sup>[17]</sup>。从图5(c)中可以看出,高阶横模的振荡已经稳定,由于高阶横模的影响,激光光斑由一个变为两个具有一定空间重叠的模式组成,由于腔内存在两个不同的基频光,每个基频光又有各自的纵模以及高阶横模结构,而且同一基频光的不同模式及不同基频光的不同模式之间在和频过程中都可能相互作用、相互影响,这使得腔内和频激光器的高阶模式的动态特性比基模模式更为复杂。为了分析简单,假设图5(c)中的多横模激光器中和频光具有2个

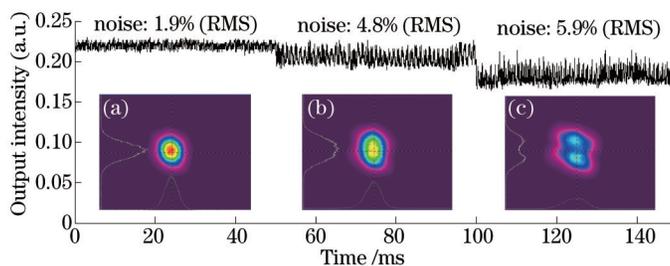


图5 不同光斑形状下的RMS噪声值

Fig.5 RMS noise with different light spot patterns

基横模,这2个基横模在谐振腔中部分交叠,形成多横模激光器。交叠部分的2个基横模共用上能级粒子,必然会互相影响和互相干扰。同时,和频光的两个横模中参与和频作用的两个不同波长的基频光在两个横模之间的交叉耦合作用也促使激光噪声的产生。因此,多横模腔内和频激光器产生较高的噪声是必然的。为更清楚地了解和频激光器的噪声起源及其特性,接下来要对和频过程中两基频光的模式及其耦合过程进行深入研究。

## 4 结 论

将I类相位匹配和频激光器噪声结合其模式结构进行了理论分析。I类相位匹配和频激光器的噪声与其激光模式结构密切相关,通过实验发现谐振腔微调 and 抽运功率的改变对激光模式结构有很大影响,多纵模结构不稳定时和频光为高噪声输出,多纵模结构稳定时为低噪声输出。并且当激光输出为高阶横模模式时,也会引起噪声的增大。

## 参 考 文 献

- 1 Gao Kang, Guo Xueshi, Zhao Ningbo, *et al.*. Measurement of the noise of Yb-doped femtosecond photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0927001.  
高 亢, 郭学石, 赵宁波, 等. 掺镱光子晶体光纤飞秒激光器噪声的测量[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0927001.
- 2 Yan Lulu, Zhang Yanyan, Zhao Wenyu, *et al.*. 186 MHz low amplitude noise erbium-doped-fiber femtosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0802004.  
闫露露, 张颜艳, 赵文宇, 等. 186 MHz低幅度噪声掺铒光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802004.
- 3 Zhan Biao, Xu Shanhu, Mo Shupe, *et al.*. Study on the relaxation oscillation suppression in a short-cavity single-frequency DBR fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090602.  
湛 彪, 徐善辉, 莫树培, 等. 短腔单频 DBR 光纤激光器中弛豫振荡噪声抑制的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 090602.
- 4 T Bear. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd: YAG lasers[J]. *Optical Society of America*, 1986, 3(9): 1175-1180.
- 5 M Oka, S Kubota. Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode-pumped Nd: YAG lasers[J]. *Optical Society of America*, 1988, 13(10): 805-807.
- 6 G E James, E M Harrell II. Elimination of chaos in an intracavity-doubled Nd: YAG laser[J]. *Optical Society of America*, 1990, 15(20): 1141-1143.
- 7 Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. Laser diode array pumped Nd: YAG dual wavelength laser with intracavity sum-frequency mixing at 589 nm[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(4): 438-442.  
吕彦飞, 檀慧明, 钱龙生. 激光二极管阵列抽运 Nd: YAG 腔内双波长运转 589 nm 和频激光器[J]. *中国激光*, 2006, 33(4): 438-442.
- 8 Lanlan Gao, Huiming Tan. Noise characteristic of sum-frequency mixing orange solid-state laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(5): 987-991.
- 9 Fu Xihong, Tan Huiming, Li Yimin, *et al.*. All-solid-state single-longitudinal-mode 593.5 nm sum-frequency laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(10): 1469-1473.  
付喜宏, 檀慧明, 李义民, 等. 全固态单纵模 593.5 nm 和频激光器[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1469-1473.
- 10 R Paschotta, H R Telle, U Keller. Noise of Solid State Lasers in Solid-State Lasers and Applications (A Sennaroglu ed)[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007: 473-510.
- 11 J D Barry, C J Kennedy. Thermo-optical instabilities and bistable behavior with the frequency-doubled Nd: YAG laser[J]. *J Appl Phys*, 1977, 48(6): 2518-2524.
- 12 S G Anderson. DPSS laser seen as argon-ion alternative[J]. *Laser Focus World*, 1996, 32(1): 16-19.
- 13 D Li, C Zhu, V Gaebler, *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): 357-364.
- 14 C Czeranowsky, V Baev, G Huber. Stabilization of intracavity frequency-doubled lasers with type I phase matching[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(21): 2100-2102.
- 15 Zhou Binkun, Gao Yizhi, Chen Tichong, *et al.*. Principle of Laser (6th edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012:

57-58.

周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理(6版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 57-58.

16 Guo Ping, Huang Ningning. Analysis of transverse modes in a laser beam[J]. Laser & Infrared, 2000, 30(1): 23-24.

郭 屏, 黄宁宁. 激光束的横模分析[J]. 激光与红外, 2000, 30(1): 23-24.

17 Li Yuwen, Li Bin. Low noise 671 nm red laser[J]. Applied Laser, 2010, 30(2): 118-121.

李玉文, 李 斌. 低噪声 671 nm 红光激光器[J]. 应用激光, 2010, 30(2): 118-121.

栏目编辑: 宋梅梅