

腔内倍频激光器中损耗对输出噪声的影响

李义民^{1,2}, 檀慧明¹, 付喜宏^{1,2}, 田玉冰^{1,2}, 王保山^{1,2}

(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:在多纵模工作状态下,腔内倍频激光器往往存在很大的倍频光输出功率噪声。通过对描述倍频激光器噪声行为的耦合微分方程组的数值模拟,发现在腔内基频光两个或者三个纵模起振的情况下,腔内基频光的损耗对于激光倍频输出的噪声存在很重要的影响。该情况下,如果基频光受到较大损耗,倍频光抖动周期变小,尖峰个数明显增多,将极大地增加倍频光功率的抖动。通过对倍频光输出功率的频谱 FFT 分析发现,当腔内基频光经受的损耗增大时,倍频输出功率在很大的频段范围内都存在噪声分布,输出功率的频谱 FFT 分布包络上面叠加的尖峰变多变密,激光器的噪声变大并趋于高频化。

关键词:腔内倍频激光器;噪声;耦合微分方程组;FFT 变换

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A

The Influence of Losses to Noise of Output Power in Intracavity-frequency-doubled Laser

LI Yi-min^{1,2}, TAN Hui-ming¹, FU Xi-hong^{1,2}, TIAN Yu-bing^{1,2}, WANG Bao-shan^{1,2}

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

Abstract: When a doubled crystal is placed within a multimode solid-state laser cavity, large amplitude fluctuations (the noise of the intracavity-frequency-doubled solid-state lasers) are observed. Through numerical simulation of coupled differential equations which describe the noise dynamics of the intracavity-frequency-doubled laser found that the losses of fundamental longitudinal modes effect the properties of noise when two or three fundamental-frequency longitudinal modes are operated. The periods of power fluctuations of intracavity-frequency-doubled laser are decreased and the numbers of peaks are increased if the losses are larger. Through FFT translation of power fluctuations of frequency-doubled laser, the noise will distribute at larger frequency regions and the frequency-spectrum of noise will remove to high-frequency regions.

Key words: intracavity-frequency-doubled laser; noise; coupled-differential-equations; FFT translation

1 引言

腔内倍频技术是扩展激光输出波长的分布频段的有效手段,以其体积小、功率高、光束质量好,光子能量高等诸多优点在高密度存储、打印、显示、荧光激发、拉曼光谱学等方面有广泛的应用^[1-3]。然而,在多纵模工作状态下,腔内倍频激光器光学谐振腔内不引入任何选频元件和偏振元件时,激光器倍频输出功率存在着非常大的高频抖动,即激光噪

声^[4],这大大地限制了全固态激光器在很多领域内的应用。

对于此类问题,美国科学家 T. Baer 于 1986 年进行了深入广泛的研究。研究结果指出,腔内倍频

基金项目:“863”课题基金资助项目(No. 2002AA311140)。

作者简介:李义民(1979-),男,在读博士,主要从事非线性光学及全固态激光光学频率变换技术方面的研究。E-mail:lym79hsd@163.com

收稿日期:2007-08-28

激光器谐振腔中基频光驻波场的空间烧空效应导致多纵模起振,多个纵模在非线性晶体内进行相互作用,和频效应使能量在不同纵模之间耦合,使倍频光出现噪声^[4]。同时,T. Baer 提出了描述激光噪声行为的耦合微分方程组,并利用该方程组对两纵模情况下进行数值模拟分析,模拟结果与实验结果相一致,证明了该方程组的正确性。随着激光技术的不断进步,出现了各种类型和各种输出波长的腔内倍频激光器,有的激光器件会对基频光引入很大的损耗,必然使激光倍频的噪声行为发生相应的改变。

本文通过对耦合微分方程的数值模拟分析,在两个和三个基频光纵模起振条件下,发现腔内基频光的损耗对于激光模式行为存在很重要的影响。如果基频光受到较大损耗,基频光本身抖动将会加剧,抖动频率和抖动中出现的尖峰个数都有所增加。在倍频光输出中,倍频光抖动频率和抖动中出现的尖峰个数也同样有所增加。同时,通过对倍频光输出功率进行 FFT 变化发现,倍频光噪声在很大频率范围都有分布,并且高频部分分布相形之下也变大。

2 耦合微分方程组简介

对于腔内倍频激光器件的动力学过程,T. Baer 采用了耦合微分方程组进行描述。该方程组是通过描述激光器中激光模式的强度 I_k 和增益 G_k 随时间变化来反映激光运转行为的^[4]:

$$\tau_c \frac{dI_k}{dt} = [G_k - \alpha_k - \varepsilon I_k - 2\varepsilon \sum_{j \neq k} I_j] I_k$$

$$\tau_f \frac{dG_k}{dt} = G_k^0 - [1 + \beta I_k + \sum_{j \neq k} \beta_{kj} I_j] G_k$$

其中, $k, j = 1, \dots, N$ 代表激光的模式序数; τ_c 为光子在光腔内的往返时间; τ_f 代表激光晶体中掺杂稀土离子的荧光寿命; α_k 为激光模的损耗参数; G_k^0 为小信号增益; ε 代表与倍频晶体有关的参数; β 代表激光模式自饱和和参数; β_{kj} 代表激光模式之间相互作用的交叉饱和参数。

3 两个纵模起振、不同损耗情况下倍频激光器输出噪声比较分析

当激光器运行时,激光器中每个激光模的增益情况由能级间粒子数反转不同决定,激光模的损耗则决定于光的衍射、谐振腔内元件的吸收、腔镜的透射等方面的原因。此外,在某些倍频激光器中,激光晶体由于利用特殊的准三能级结构也会对基频激光本身存在再吸收损耗。例如利用 Nd:YAG 晶体中 946nm 谱线倍频到 473nm 的蓝光激光器、利用 Nd:YVO₄ 晶体中 914nm 谱线倍频到 457nm 的深蓝激光器等^[5-6]。

这类激光器在较低输出功率下,引入的再吸收损耗与普通中小功率倍频激光器损耗相比拟。所以,分析在不同损耗程度下倍频激光器的噪声的变化是十分必要的。

3.1 较低损耗情况下的倍频激光噪声分析

对典型的基频光两纵模情形下进行考察,参数选用如下: $\alpha_1 = 0.015, \alpha_2 = 0.016; \tau_c = 0.5\text{ns}; \tau_f = 0.24\text{ms}; \varepsilon = (5E - 5)\text{W}^{-1}; \beta = 1\text{W}^{-1}; G_1^0 = G_2^0 = 0.12; \beta_{12} = \beta_{21} = 0.666\text{W}^{-1}$ 。这与 T. Baer 所采用的参数一致,比较符合普通中小倍频激光器中较小的损耗情况^[4]。利用四阶 Runge - Kutta 法进行数值模拟计算,获得了与其完全一致的每个基频光的抖动情况,每个基频光纵模具有一个尖峰然后伴随着一段时间的平台结构,如图 1 所示。同时这里给出两模情况下的倍频输出光的功率抖动情形,数值模拟计算表明:倍频光输出具有约 40μs 周期性的尖峰振荡结构,每一个周期内有两个尖峰伴随一小段平台结构,如图 2 所示。

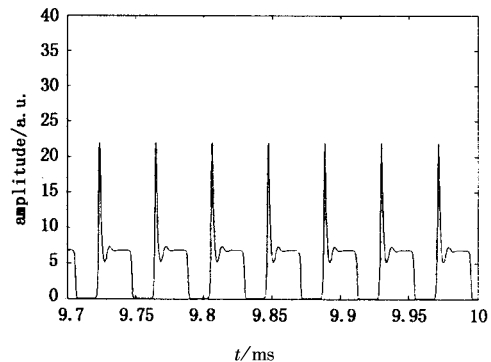


图1 基频光两模起振时,损耗参数较小时基频光抖动情况

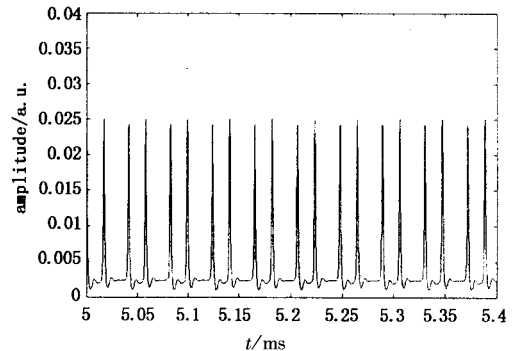


图2 基频光两模起振时,损耗参数较小时倍频光抖动情况

3.2 较大损耗情况下的倍频激光噪声分析

在很多典型的激光器尤其是准三能级倍频激光器中,损耗参数往往很大,在两模起振条件下,除了损耗参数外,其他参数完全与前面相同。这里损耗参数可以有两种方式进行选择:一是可以将损耗参数增大到一定程度。而针对准三能级倍频激光器,

其再吸收损耗随着腔内基频光的循环强度变化。可以在原有普通四能级激光器损耗参数上再附加再吸收损耗项。再吸收损耗项具体表达如下^[7]：

$$\delta_{\text{rea}} = \sigma f_1 N_{\text{ion}} L I_{\text{sat}} \ln(1 + 2I/I_{\text{sat}}) / I$$

其中, σ 为激光器基频光谱线的受激发射截面; f_1 为基频激光下能级的布居百分比; N_{ion} 为激光晶体中离子的掺杂浓度; 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_{sat} 为腔内基频光饱和光强; 它通过表达式 $I_{\text{sat}} = h\nu / [(f_1 + f_u) \sigma \tau]$ 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。

数值模拟分析过程发现, 两种选择损耗参数的方式下所得的激光抖动一致, 所以模拟结果不区分两种不同的参数选择方式。

数值计算结果表明: 在激光器腔内基频光的损耗增大时, 无论基频光还是倍频光, 它们的抖动情况都发生了明显的变化。与较小损耗情况下相比, 每个基频光纵模的抖动由相继于一个瞬间尖峰后的平台也形成了一个新的尖峰, 同时周期变小, 即抖动加快, 如图3所示。倍频输出则发生了更大的变化, 倍频输出再也观察不到任何明显平台结构, 更突出的是虽然倍频输出仍然表现出周期性结构, 但尖峰变得密集, 周期变小, 从原来的约 $40\mu\text{s}$ 减小到约 $28\mu\text{s}$, 即噪声明显趋于高频, 每个周期内的尖峰个数也明显增多, 从原来的2个变到4个, 如图4所示。

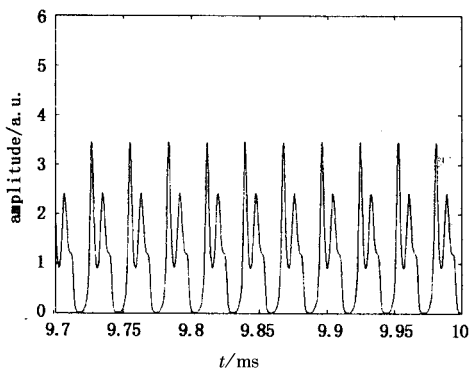


图3 基频光两模起振时, 损耗参数较大时基频光抖动情况

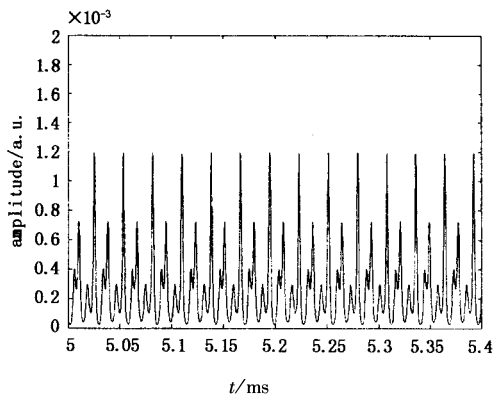


图4 基频光两模起振时, 损耗参数较大时倍频光抖动情况

3.3 两种损耗大小下的倍频输出功率抖动的频谱分析比较

从对耦合微分方程组的数值模拟结果中可以看出, 基频光两个纵模起振时, 腔内倍频激光器在不同损耗情况下, 倍频输出功率的噪声存在很大的差别, 主要表现为在损耗变大的情况下, 倍频光的抖动周期变小、尖峰增多、抖动变快。为了更直观地比较两种差别, 对两种状态下的倍频光的功率进行了 FFT 变换, 所得的激光功率频谱如图5所示。

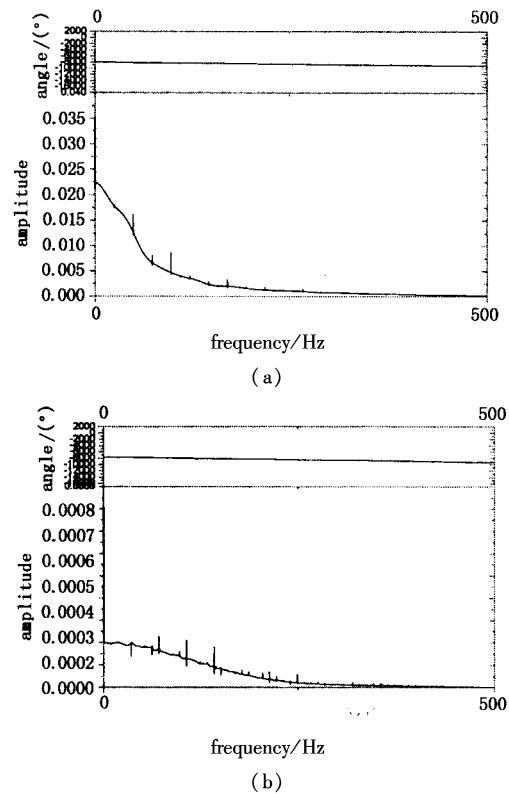


图5 (a) 基频光两模起振时, 损耗参数较小时倍频功率的 FFT 谱分布
(b) 基频光两模起振时, 损耗参数较大时倍频功率的 FFT 谱分布

从图中可以看出, 当腔内基频光损耗参数变大时, 倍频光输出功率的频谱 FFT 分布明显发生变化, 一方面倍频光输出功率频谱 FFT 分布包络整体有向高频移动趋势; 同时, 当损耗参数变大时, 输出功率的频谱 FFT 分布包络上面叠加的尖峰变多变密, 高频部分更为明显。这些都表明当腔内基频光损耗加大时, 激光器的噪声变大并趋于高频化。

4 三个纵模起振、不同损耗情况下倍频激光器输出噪声比较分析

类似于上述数值模拟计算, 本文对三个基频光纵模起振情况下倍频激光器输出噪声也进行了分析。得出了类似两纵模起振情况下的结果, 只是这里由于模式个数的增多, 光的抖动行为变得更加剧烈

烈和无规律。选择参照 James 的文献^[8], 在小损耗情况下参数的选择如下: $\alpha_1 = 0.015, \alpha_2 = 0.015; \alpha_3 = 0.015; \tau_c = 0.5\text{ns}; \tau_f = 0.24\text{ms}; \varepsilon = (5E - 5) \text{W}^{-1}; \beta = 1 \text{W}^{-1}; G_1^0 = G_2^0 = 0.12; \beta_{12} = \beta_{21} = 0.29 \text{W}^{-1}$ 。这里直接给出其中一个基频光纵模的抖动情况, 也与 James 的分析结果完全一致。同时这里还给出了三个基频光纵模条件下的倍频光输出抖动情况, 分别如图 6 和图 7 所示。

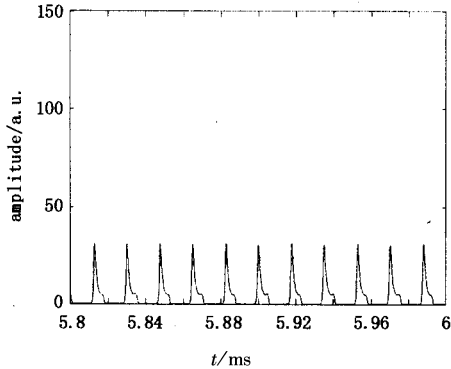


图 6 基频光三个纵模起振时, 损耗参数较小时基频光抖动情况

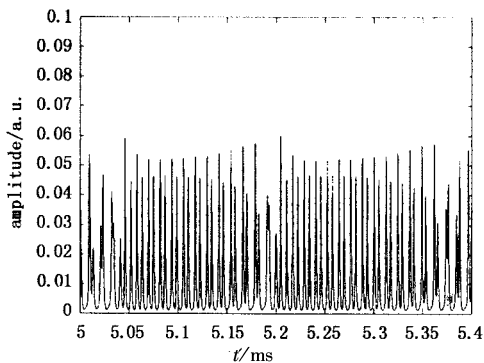


图 7 基频光三个纵模起振时, 损耗参数较小时倍频光抖动情况

对于损耗变大情况, 损耗参数在模拟时增到 0.045, 其他参数不变。分别得到三个基频光纵模条件下的每个基频光振荡和倍频光振荡情况, 如图 8 和图 9 所示。

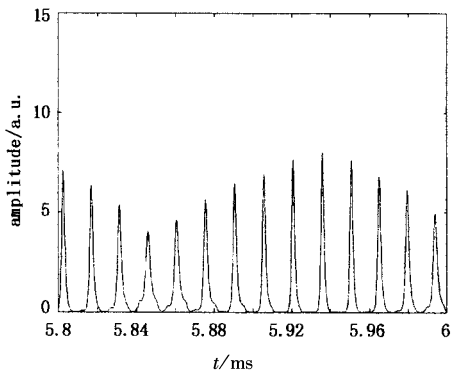


图 8 基频光三个纵模起振时, 损耗参数较大时基频光抖动情况

从上述对三个基频光纵模起振情况的分析可以看出, 对于在不同的损耗条件下, 激光的输出特性存在着明显的不同。对于基频光, 损耗的增大使其振荡尖峰变得具有随时间变化的特点, 不再是幅值恒定。对于倍频光可以看出, 单位时间内的尖峰个数仍是明显增多。

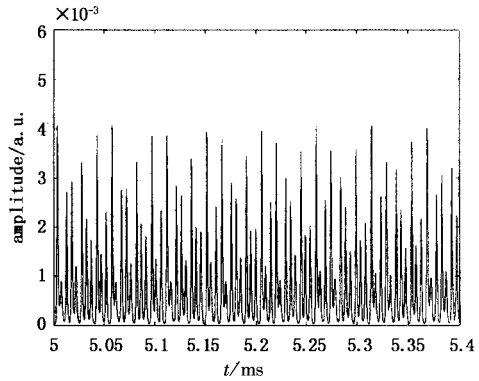
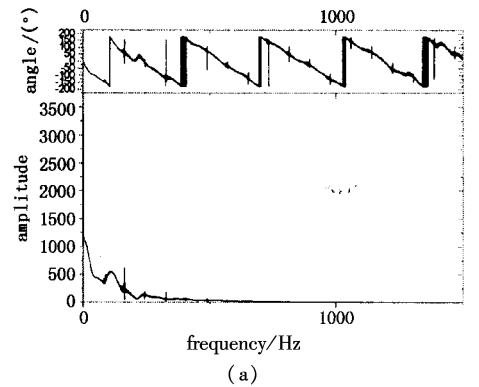
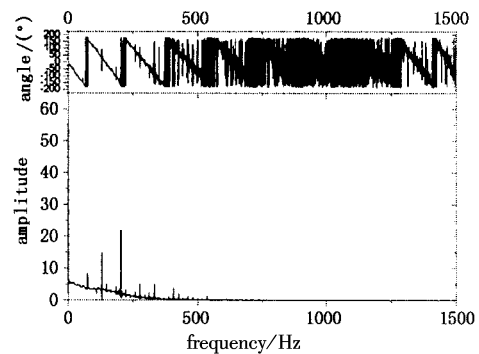


图 9 基频光三个纵模起振时, 损耗参数较大时倍频光抖动情况

对于不同损耗下的倍频光的频谱 FFT 变换, 我们仍发现与两基频光纵模起振条件下类似的情形, 主要也是表现在当损耗参数变大时, 输出功率的频谱 FFT 分布包络有向高频移动趋势, 且上面叠加的尖峰变多变密, 频谱 FFT 变换结果如图 10(a) 和图 10(b) 所示。

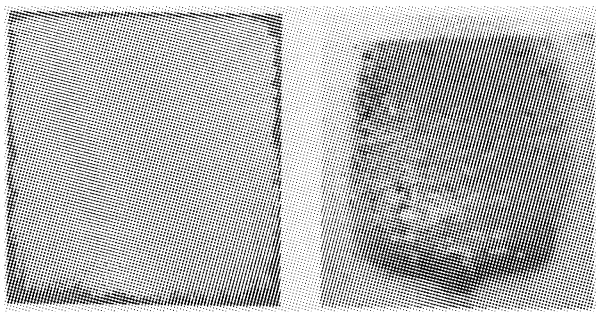


(a)



(b)

图 10 (a) 基频光三个纵模起振时, 损耗参数较小时倍频功率的 FFT 谱分布
(b) 基频光三个纵模起振时, 损耗参数较大时倍频功率的 FFT 谱分布



(a) 单个脉冲照射热敏纸 (b) 重复脉冲照射耐火砖
(a) single pulse on thermosensitive paper (b) repetitive pulses on firebrick

图6 激光近场光斑

Fig.6 near field laser spot

参考文献:

- [1] L N Myrabo. Brief history of the lightcraft technology demonstrator(LTD) project[C]//AIP Conf. Proc.,2003, 664:79-60.
- [2] W L Bohn, W O Schall. Laser propulsion activities in Germany[C]//AIP Conf. Proc.,2003,664:49-94.
- [3] V Hasson. Review of design concepts and diagnostics for 100kW-class repetitive pulsed CO₂ laser [C]//SPIE, 2003,5120:717-730.
- [4] 翟冰洁,左都罗,程祖海,等. 空气呼吸模式激光推进实验研究[J]. 光学与光电技术,2005,3(1):14-17.
- [5] Leik N Myrabo. Brief history of the lightcraft technology demonstrator (LTD) project [C]//Andrew V Pakhomov ed. Proceedings of the First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Huntsville, Alabama, USA, published in AIP Conference Series,2003,49-60.
- [6] 张莉莉,任德明,胡孝勇,等. 一种新型 TEA CO₂ 激光器的实验研究[J]. 光学技术,2006,32(1):131-133.
- [7] 吴谨,王东蕾,唐永新,等. 顺序放电高重复频率 TEA CO₂ 激光器[J]. 中国激光,2005,32(1):1-4.
- [8] 李小芬,左都罗,程祖海,等. 紫外预电离 TEA CO₂ 激光器放电特性的实验研究[J]. 强激光与粒子束,2004,16(6):697-700.
- [9] Singal V P, Vijayan R, Narayan B S, et al. A highly efficient electron beam controlled switchless multi-joule TEA CO₂ laser[J]. Infrared physics and technology,2003,44:69-73.
- [10] Satyanarayana D V, Mohan M S, Nundy U. All solid state switched high efficiency pulser sustainer TEA CO₂ laser [J]. Rev Sci Instrum,1995,66(3):2391-2393.
- [11] 奚惠江,刘金授,陈宗柱,等. 紫外预电离 TEA CO₂ 激光器放电特性的研究[J]. 激光与红外,1989,19(3):34-37.
- [12] Bruno W. Surface corona discharge preionization of gas-flow TEA laser[J]. J. Phys E:Sci Instrum,1987,20(7):457-458.
- [13] 李殿军,杨贵龙. TEA CO₂ 激光器主放电延迟时间对效率的影响[J]. 光学精密工程,2006,14(5):807-810.
- [1] LBO 525nm 绿光激光器 [J]. 激光与红外,2007,37(2):20-22.
- [3] 张玉萍,郑义,张会云,等. 高稳定 LD 泵浦腔内倍频 Nd:YVO₄/KTP 连续绿光激光器[J]. 光子学报,2006,35(07):12-15.
- [4] T Baer. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers[J]. JOSA B,1986,3(9):1175-1180.
- [5] 禹国俊,姚建铨,郭丽,等. LD 纵向泵浦的 946nm Nd:YAG 准三能级激光系统的研究[J]. 量子电子学报,2003,20(6):675-679.
- [6] 刘伟仁,霍玉晶,何淑芳. 激光二极管抽运的全固体 457nm 深蓝激光器[J]. 光学学报,2002,22(8):980-982.
- [7] 王青圃,张行愚,李平,等. 腔内倍频的准三能级连续激光器理论[J]. 中国科学 E 辑,2003,33(10):954-960.
- [8] Glenn E James, Evans M Harrell II, Rajarshi Roy. Intermittency and chaos in intracavity doubled lasers. II [J]. PRA,1990,41(5):2778-2790.

(上接第 125 页)

5 结论

通过对两个和三个基频纵模起振条件下,不同损耗大小时的基频光抖动、倍频光抖动和倍频光功率的频谱 FFT 分布分析可以看出,在腔内倍频激光器中,腔内基频光纵模所经历的损耗对于倍频光噪声行为存在着很大的影响。当腔内基频光纵模损耗变大时,倍频光抖动周期变小,尖峰个数明显增多。通过对倍频光频谱 FFT 分析发现,当损耗参数变大时,输出功率的频谱 FFT 分布包络有向高频移动趋势,且上面叠加的尖峰变多变密。这在高频部分表现更为明显,说明激光器的噪声变大并趋于高频化。

参考文献:

- [1] 吕彦飞,檀慧明,高兰兰,等. LBO I 类临界相位匹配内腔和频 593.5nm 激光器[J]. 激光与红外,2005,35(1):45-47.
- [2] 曹洪忠,檀慧明,王保山,等. LD 端面泵浦 Yb:YAG/