

# 抑制 Nd:YAG 激光器自锁模的实验研究

田 飞<sup>1,2</sup> 罗 佳<sup>1</sup> 胡大平<sup>3</sup> 叶一东<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900  
<sup>2</sup>中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088  
<sup>3</sup>四川中物科技集团有限公司, 四川 绵阳 621000

**摘要** 用于抽运钛宝石的电光调 Q Nd:YAG 激光器会出现自锁模调制, 导致峰值功率不稳从而损伤钛宝石晶体, 为了抑制这种自锁模调制, 分析了产生该现象的原因, 研究了谐振腔内插入法布里-珀罗(F-P)标准具的技术方案。实验采用单个厚度 20 mm, 膜层反射率 60% 的标准具, 有效抑制了该 Nd:YAG 激光器的自锁模调制, 实现了脉宽约 70 ns, 脉冲能量约 600 mJ 的 1064 nm 激光的稳定输出, 既避免了引入较大的插入损耗, 又防止了对 F-P 标准具膜层的损伤。分析认为单个厚度合适、膜层反射率不太高的标准具可有效抑制 Nd:YAG 激光器自锁模现象的原因在于: 标准具一个透射峰半峰全宽(FWHM)内理论上虽有约 5 个纵模, 但偏离透射峰中心的纵模损耗较大, 使得单个透射峰内实际起振的纵模可能只有 1 个; 激光器的增益线宽内虽存在标准具的多个透射峰, 但起振纵模因不相邻避免了形成相位锁定。

**关键词** 激光器; Nd:YAG; F-P 标准具; 自锁模; 调 Q 激光

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0502007

## Experimental Study on Eliminating Self-Mode Locking of Nd:YAG Laser

Tian Fei<sup>1,2</sup> Luo Jia<sup>1</sup> Hu Daping<sup>3</sup> Ye Yidong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China  
<sup>2</sup>Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China  
<sup>3</sup>Sichuan SINOEP Group Co., Ltd, Mianyang, Sichuan 621000, China

**Abstract** The phenomena of self-mode locking in Q-switched Nd:YAG laser used for pumping Ti:sapphire will result in instability of laser pulse peak power output and mangle the optical devices. In order to eliminate this phenomena availablely, the reason caused for self-mode locking is investigated, and Fabry-Perot (F-P) etalon with different parameters is employed. By using one piece of 20 mm-thick F-P etalon with a reflectivity of 60%, which can not only reduce inserting loss but also avoid the damage of F-P etalon's coatings, a smooth pulse waveform in pulse width of 70 ns and pulse energy of 600 mJ at 1064 nm is realized, the reason for it may be as follows: though there are probably five longitudinal modes in a full width at half maximum (FWHM) of F-P etalon theoretically, only one longitudinal mode may be able to oscillate considering the loss; though there are several transmission peaks in the gain bandwidth of Nd:YAG, inconiguous longitudinal modes can not meet the condition of mode locking.

**Key words** lasers; Nd:YAG; F-P etalon; self-mode locking; Q-switched laser

**OCIS codes** 140.3425; 140.3570; 140.4050; 140.3520

## 1 引 言

采用电光调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器输出的 532 nm 光抽运钛宝石晶体, 产生 750~950 nm 宽波段范围内可调谐的窄线宽激光输出, 并进行二倍频或三倍频, 基于差分吸收原理测量大气中某些气体

的浓度。由于钛宝石的荧光寿命为 3.2 μs, 为了使抽运源输出较长的脉宽, Nd:YAG 激光器谐振腔采用了 1 m 的腔长, 获得了调 Q 脉宽 60~90 ns(半峰全宽, FWHM), 脉冲能量约 300 mJ 的 532 nm 激光输出。用该光源抽运钛宝石晶体时极易造成晶体的

收稿日期: 2011-12-01; 收到修改稿日期: 2012-02-08

作者简介: 田 飞(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光技术与应用等方面的研究。E-mail: tianfeiwuli@sina.com

导师简介: 叶一东(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光和光学工程等方面的研究。E-mail: yidongye@163.com

损伤,用示波器观察其输出波形,发现存在明显的自锁模调制现象。腔长较长的调 Q Nd:YAG 激光器中这种自锁模调制是经常出现的<sup>[1~5]</sup>,且调制尖峰会导致腔内峰值功率密度增加,从而损伤腔内以及后级应用中的光学元件。为了解决上述问题,本文分析了导致 Nd:YAG 激光器出现自锁模的原因,并设计了腔内插入法布里-珀罗(F-P)标准具的技术方案,通过实验研究,采用厚度合适、膜层反射率不太高的单个 F-P 标准具可成功抑制该激光器中的自锁模调制现象。

## 2 Nd:YAG 激光器实验装置及其自锁模调制现象

实验用的 Nd:YAG 激光器结构如图1所示,采用 1 只脉冲氙灯同时抽运两根直径分别为 4 mm 和 8 mm 的 Nd:YAG 棒,其中  $\phi 4$  mm 棒用作振荡级, $\phi 8$  mm 棒用作放大级。谐振腔为虚共焦变反射率镜非稳腔(VRMUR),全反腔镜(HRM)为凹面镜,曲率半径 4 m,输出腔镜为弯月形变反射率镜(VRM),曲率半径 2 m,其反射膜区直径 5 mm,反射率近似为高斯分布,中心透射率 70%,边沿透射率接近 100%。采用KD\*P晶体电光调 Q,振荡级输出 1064 nm 的线偏振光,经扩束进入放大级,再经过 KTP 晶体倍频获得 532 nm 激光。以上所有器件共同组成了一台腔长  $L \approx 1$  m 的单灯双棒主振荡功率放大器(MOPA)结构 Nd:YAG 倍频激光器,用于抽运钛宝石晶体产生可调谐的激光输出。

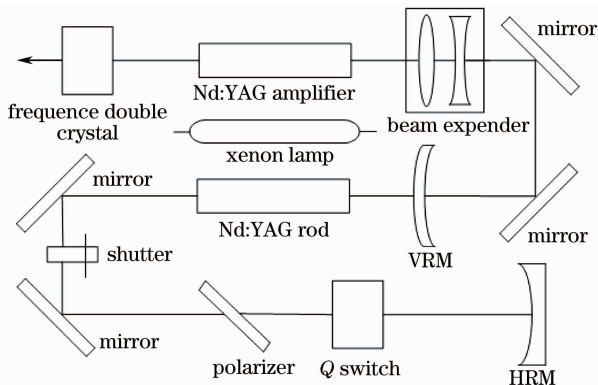


图 1 变反射率非稳腔调 Q Nd:YAG 激光器光路  
Fig. 1 Layout of Q-switched Nd:YAG laser with VRMUR

用示波器观察 Nd:YAG 激光器的输出波形,发现有许多起伏的小峰,并且各个小峰之间存在确定的周期性,即激光脉冲出现了自锁模调制现象,如图 2 所示。观察发现,相邻小波峰的间隔  $\tau \approx$

6.78 ns,与激光器等效腔长  $2L/c$  是一致的。

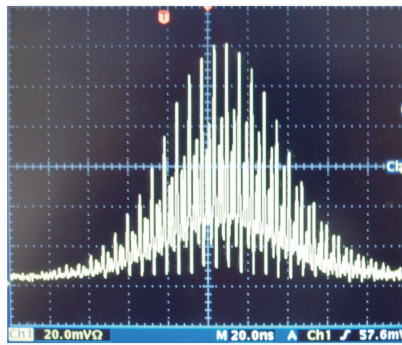


图 2 Nd:YAG 激光器自锁模调制波形

Fig. 2 Waveform of self-mode locking Nd:YAG laser

对于自锁模现象,目前较为普遍的理解是激光器相邻纵模的拍频信号发生了自锁定<sup>[6~9]</sup>,由于被锁定的纵模数不同,波形调制深度也不尽相同,被锁定的纵模数越多,调制深度越大,反之亦然。要抑制这种自锁模调制现象<sup>[10,11]</sup>,就要破坏产生自锁模所必要的频率和相位条件,或者减小被锁定的纵模数相对于总的振荡纵模数的比值。要彻底消除自锁模调制现象,最为有效的方法是实现单纵模运转,谐振腔内插入 F-P 标准具是抑制或消除自锁模现象最为简单有效的方法之一。

F-P 标准具由于精细度所限,自由光谱宽度常为透射峰宽度的 30 倍左右,对于增益线宽较宽的激光器,使用单个标准具选模一般不能实现单纵模输出,需要同时使用多个标准具或标准具与其他选模技术相结合。要在腔长 0.85 m 的 Nd:YAG 激光器上实现单纵模运转,蓝信钜等<sup>[12]</sup>通过理论计算建议使用两个标准具,一个厚度 0.83 mm,膜层反射率  $R=94\%$ ,另一个厚度 0.41 mm,膜层反射率  $R=75\%$ ;徐荣青等<sup>[11]</sup>使用透、反两个标准具(一个厚度 11 mm,膜层反射率 70%,另一个厚度 2 mm,膜层反射率 30%),在腔长 0.35 m 的 Nd:YAG 激光器上实现了连续单纵模输出;宋宝安等<sup>[13]</sup>采用选频光栅与标准具相结合,在主动调 Q Nd:YAG 激光器上实现了单纵模输出,所用标准具厚度 5 mm,膜层反射率  $R=80\%$ ;吴边<sup>[6]</sup>采用预激光调 Q 与单个 F-P 标准具(厚度 1 mm)相结合的技术,在腔长 0.80 m 的钕玻璃激光器上获得了单纵模输出,有效消除了自锁模现象,实现了激光器稳定输出调制度很小且波形相当光滑的激光脉冲。

使用多个标准具组合虽可实现单纵模输出,抑制自锁模调制,但会给激光器引入较大的插入损耗,增加出光阈值。采用标准具与其他选模技术相结合

获得单纵模输出抑制自锁模调制,操作复杂且会增加成本。另外,对反射率为  $R$  的标准具,其内部功率密度为谐振腔内功率密度的  $(1-R)^{-1}$  倍,对于高功率密度的调 Q 激光器,膜层反射率很高的标准具极易因内部功率密度过大而损伤。为了避免引入较大的插入损耗,同时防止标准具膜层被调 Q 激光损伤,本文尝试使用单个反射率不太高的标准具进行纵模选择以便实现对自锁模调制的抑制。

### 3 实验结果及分析讨论

#### 3.1 实验结果

设计加工了两种不同厚度的标准具:  $d_1 = 6$  mm,  $d_2 = 20$  mm,材料为融石英,对 1064 nm 波长

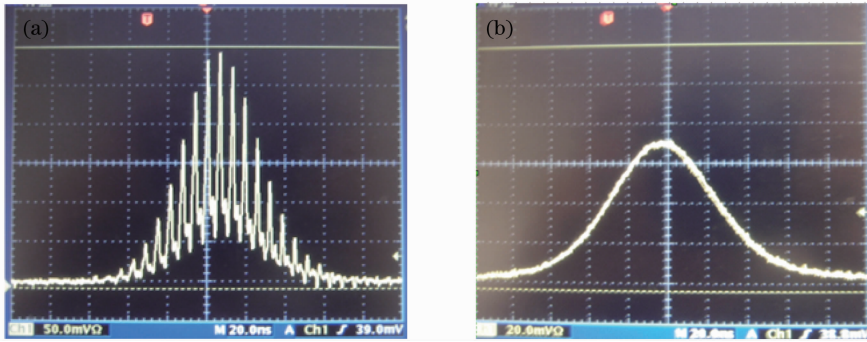


图 3 插入不同厚度 F-P 标准具时 Nd:YAG 激光器的输出波形。(a)  $d_1 = 6$  mm; (b)  $d_2 = 20$  mm

Fig. 3 Waveform of Nd:YAG laser with inserting F-P etalons of different thicknesses. (a)  $d_1 = 6$  mm; (b)  $d_2 = 20$  mm

#### 3.2 分析与讨论

标准具对不同波长的光具有不同的透射率,其透射率函数为<sup>[14~18]</sup>

$$T(\lambda) = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left[ \frac{\delta(\lambda)}{2} \right]}, \quad (1)$$

式中  $R$  为标准具反射率,  $\delta(\lambda) = (4\pi nd \cos \theta) / \lambda$  是标准具中参与多光束干涉效应的相邻两束出射光线的相位差,  $\lambda$  为波长,  $n$  为标准具折射率,  $d$  为标准具厚度,  $\theta$  为入射光束进入标准具的折射角。

标准具相邻透射峰的间隔为

$$\Delta\nu_m = \frac{c}{2nd \cos \theta}, \quad (2)$$

每个透射峰的谱线 FWHM 为

$$\Delta\nu_k = \frac{c}{2\pi nd} \cdot \frac{1-R}{\sqrt{R}}. \quad (3)$$

Nd:YAG 介质的增益线宽  $\Delta\nu$  约为 200 GHz,对于腔长 1 m 的激光器,纵模间隔  $\Delta\nu_k$  仅为 0.15 GHz,自由运转情况下能起振的纵模数极多。用单个 F-P 标准具选模,理论上 Nd:YAG 介质的增益线宽内会存在多个标准具的透射峰(介质增益线宽内透射峰个

折射率为  $n=1.45$ ,标准具两面镀 1064 nm 反射膜,反射率  $R=60\%$ ,在图 1 所示的调 Q 晶体与全反腔镜之间插入 F-P 标准具。

当标准具厚度  $d_1 = 6$  mm 时,在示波器上观察到的典型激光输出脉冲波形如图 3(a) 所示,输出脉冲的自锁模调制得到了一定程度的抑制,但调制深度依然较大。

当标准具厚度  $d_2 = 20$  mm 时,激光输出脉冲波形如图 3(b) 所示,其自锁模调制现象得以有效抑制,激光输出波形相当光滑。实验观察了 2 min 内约 1200 个脉冲输出,均未看到调制现象。总之,采用上述方法使该 Nd:YAG 激光器的自锁模现象得到了有效抑制,实现了激光脉冲能量的稳定输出。

数  $N_p \approx \Delta\nu / \Delta\nu_m$ ),单个标准具透射峰内会存在多个纵模(透射峰内纵模个数  $N_m \approx \Delta\nu_k / \Delta\nu_q$ ),因此该方法选模一般不能实现单纵模输出,但实验发现使用单个厚度 20 mm、反射率 60% 的标准具可有效抑制 Nd:YAG 激光器的自锁模调制,且效果明显优于厚度 6 mm、反射率 60% 的标准具。上述两种不同参数的标准具透射参数特性如表 1 所示。

表 1 不同参数标准具透射率参数特性

Table 1 Transmissivity characters of F-P etalon with different parameters

Parameters of F-P etalon	$\Delta\nu_m$ /GHz	$\Delta\nu_k$ /GHz	$N_p$	$N_m$
$R=60\%$ , $d_1=6$ mm	17.2	2.82	11	19
$R=60\%$ , $d_2=20$ mm	5.2	0.85	38	5

分析原因认为,当标准具厚度  $d_1 = 6$  mm 时,其单个透射峰内的纵模理论上约有 19 个之多,仍有相邻纵模起振,不能有效抑制自锁模现象的发生。当标准具厚度  $d_2 = 20$  mm 时,虽然单个透射峰内的纵模理论上仍有 5 个左右,但单个透射峰中相邻的不同纵模有不同的损耗,另一方面由于标准具的透射率与光束入射角有关,激光器采用了虚共焦非稳腔,

腔内激光从两个不同方向通过标准具时入射角有一定差别,进一步增大了偏离标准具透射峰中心纵模的损耗,可进一步抑制相邻纵模的起振,甚至有可能使得单个透射峰内只有一个纵模起振。虽然在 Nd:YAG 介质增益线宽内的透射峰个数多达 38 个,由于谱线增益有一定分布,不同透射峰内的谱线有不同的增益大小,因为模式竞争实际能起振的透射峰可能远少于 38 个。即使有多个透射峰内的谱线起振,但它们不是相邻纵模,难以形成稳定的相位锁定,因此不会形成锁模调制。

## 4 结 论

实验发现,腔长较长的调 Q Nd:YAG 激光器易出现自锁模调制,损伤光学器件,需要采取简单且有效的措施抑制这种自锁模现象。实验采用了谐振腔内插入 F-P 标准具的技术方案,通过对不同参数标准具的对比,发现厚度合适、膜层反射率不太高的单个标准具就可有效抑制 Nd:YAG 激光器中的自锁模调制,避免了给激光器引入较大的插入损耗,同时低膜层反射率可防止因标准具内部功率密度过大导致其损伤的问题。

对于腔长 1 m 的单灯抽运双棒 MOPA 结构 Nd:YAG 激光器,实验使用厚度 20 mm、膜层反射率 60% 的单个标准具,成功抑制了其自锁模现象,获得了脉宽约 70 ns、脉冲能量约 600 mJ 的 1064 nm 激光稳定输出,经过 KTP 晶体后得到约 300 mJ 的倍频 532 nm 绿光。分析认为,厚度合适而膜层反射率不太高的单个标准具可有效抑制 Nd:YAG 激光器中自锁模现象的原因在于:在同一个标准具透射峰的 FWHM 内,理论上虽包含约 5 个纵模,但由于偏离透射峰中心的纵模有较大损耗,使得单个透射峰内实际能起振的纵模可能只有 1 个;虽然在激光器的增益线宽内包含了较多的标准具透射峰,即使有多个透射峰内的谱线起振,但因不是相邻纵模难以形成相位锁定。

## 参 考 文 献

- 1 Fan Liming, Zhu Guoying, Chen Shisheng *et al.*. Self-mode-locking in Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**(1): 16~20  
樊立明, 朱国英, 陈时胜等. Nd:YAG 激光器中的自锁模[J]. *光学学报*, 1992, **12**(1): 16~20
- 2 Guo Dahao, Wu Hongxing, Wang Shengbo *et al.*. Self-mode-locking in silicate glass laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(3): 198~201  
郭大浩, 吴鸿兴, 王声波等. 掺钕硅酸盐玻璃激光器中的自锁模现象[J]. *光学学报*, 1991, **11**(3): 198~201

- 3 Zeng Heping, Luo Ting, Zhao Jiran *et al.*. Self mode-locking control in Q-switch Nd:YAG laser with fullerenes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, **40**(3): 219~222  
曾和平, 罗挺, 赵继然等. 富勒烯抑制调 Q Nd:YAG 激光器中的自锁模[J]. *科学通报*, 1995, **40**(3): 219~222
- 4 Zhang Guoxuan, Huang Guosong, Chen Xexing *et al.*. Self-mode-locking in phosphate glass laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(2): 170~174  
张国轩, 黄国松, 陈泽兴等. 磷酸盐玻璃激光器中的自锁模现象[J]. *光学学报*, 1989, **9**(2): 170~174
- 5 Zhang Haikun, Chen Xiufeng, Wang Peiji *et al.*. Laser diode pumped self-mode-locking laser with a self Q-switched Cr<sup>4+</sup>:Nd<sup>3+</sup>:YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 738~742  
张海鹏, 陈秀峰, 王培吉等. 激光二极管抽运 Cr<sup>4+</sup>:Nd<sup>3+</sup>:YAG 自锁模自调 Q 激光器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 738~742
- 6 Wu Bian. Model target existed in Q-switched laser and instability of output pulse power[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 49~52  
吴边. 调 Q 激光自锁模与脉冲峰值功率的输出不稳定性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 49~52
- 7 H. Statz, G. A. DeMars, C. L. Tang. Self locking of modes in lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**(5): 2212~2222
- 8 C. L. Tang, H. Statz. Maximum-emission principle and phase locking in multimode lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**(7): 2963~2968
- 9 Wu Qi, Zhou Jianying, Huang Xuguang *et al.*. A novel mode locking technique for CW Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, **13**(10): 883~887  
邬起, 周建英, 黄旭光等. 一种连续 Nd:YAG 激光锁模的新技术[J]. *光学学报*, 1993, **13**(10): 883~887
- 10 Guo Dahao, Wu Hongxing, Wang Shengbo *et al.*. Elimination of self-mode-locking in laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, **A20**(5): 341~344  
郭大浩, 吴鸿兴, 王声波等. 激光自锁模现象的消除[J]. *中国激光*, 1993, **A20**(5): 341~344
- 11 Xu Rongqing, Lu Yaodong, Lan Xinju *et al.*. A new single-axial-mode(SAM) CW Nd:YAG laser[J]. *Journal of East China Shipbuilding Institute*, 2000, **14**(4): 83~86  
徐荣青, 陆耀东, 蓝信钜等. 一种新型单纵模连续 Nd:YAG 激光器[J]. *华东船舶工业学院学报*, 2000, **14**(4): 83~86
- 12 Lan Xinju, Yao Jianquan, Li Yu *et al.*. Laser Technique[M]. Beijing: Science Press, 2000. 184~186  
蓝信钜, 姚建铨, 李昱等. *激光技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 184~186
- 13 Bao'an Song, Weijian Zhao, Deming Ren *et al.*. Passively Q-switched laser with single longitudinal mode based on the frequency selection of grating and F-P etalon in twisted-mode folded cavity[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 805~808
- 14 Zhong Xihua. Modern Fundamentals of Optics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003. 198~205  
钟锡华. *现代光学基础*[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. 198~205
- 15 Sun Xutao, Chen Weibiao. Theoretical study on laser frequency stabilization in reference to Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2219~2222  
孙旭涛, 陈卫标. 基于法珀标准具的激光稳频方法理论研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2219~2222
- 16 Xue Junwen, Pei Xuedan, Su Binghua *et al.*. Study of F-P etalon using in lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(3): 031402  
薛峻文, 裴雪丹, 苏秉华等. 激光器中 F-P 标准具的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(3): 031402
- 17 Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. Spectral selection in He-Ne laser by internal F-P etalon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009,

29(11): 3108~3113

梁 晶, 龙兴武, 张 斌等. 一种内置法布里-珀罗标准具选择 He-Ne 激光器内谱线的方法[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3108~3113

18 Nie Xiaoming, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. 629 nm He-Ne

laser using built-in Fabry-Perot etalon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0814004

聂晓明, 龙兴武, 张 斌等. 内置法布里-珀罗标准具 629 nm He-Ne 激光器[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0814004

栏目编辑: 宋梅梅