

文章编号: 1001-3806(2011)03-0412-03

## 主被动锁模脉冲氙灯抽运 Nd:YAG 激光器的研究

袁易君

(宜春学院 理工学院, 宜春 336000)

**摘要:** 为了克服主动锁模脉冲能量低、被动调  $Q$  锁模稳定性差、锁模不完全的缺点,采用  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 和声光锁模器进行主被动联合锁模脉冲氙灯抽运的 Nd:YAG 激光器,实验验证和分析了  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 被动锁模,声光锁模器主动锁模及两者联合主被动锁模 3 种情况下输出脉冲的特性。结果表明,主被动联合锁模可得到 200mJ 输出能量、输出幅值和能量抖动小于  $\pm 5\%$ 、锁模深度 100%、脉宽小于 450ps 的 1064nm 锁模脉冲输出,腔外增加 KTP 倍频晶体,可得到约 41% 的转换效率的 532nm 稳定锁模脉冲输出。这一结果验证了主被动锁模技术的可行性,有利于锁模技术的进一步发展。

**关键词:** 激光器;  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG; 声光锁模器; 主被动锁模; 抽运

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.032

### Research of actively-passively mode-locked Nd:YAG laser pumped by pulse xenon lamp

YUAN Yi-jun

(Physics Science and Engineering College, Yichun University, Yichun 336000, China)

**Abstract:** In order to resolve the low output energy of active mode-locked laser and instability of passive mode-locked laser,  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG passive mode-locker and acousto-optic active mode-locker were used jointly for Nd:YAG laser mode-locking. The output characteristics of passively mode-locked by  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG only, actively mode-locked by acousto-optic mode-locker only and mode-locked by  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG and acousto-optic jointly were analyzed and compared through experiments. Results showed that the joint mode-locking method gave good resolution to the low output energy and stability, and the mode-lock amplitude and energy fluctuation were less than  $\pm 5\%$ , with the depth of mode locking of 100%, pulse width less than 450ps and output energy near 200mJ at 1064nm wavelength. Adding KTP crystal out of the cavity, the output conversion efficiency was about 41% at 532nm wavelength. The results show the possibility of actively-passively mode-locked technology and it is helpful for the development of mode-locking technology.

**Key words:** lasers;  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG; acousto-optic mode-locker; actively-passively mode lock; pumping

## 引言

多年来,人们一直采用有机染料作为可饱和吸收体来实现脉冲式抽运的 Nd:YAG 激光器的被动锁模,再配以倍频晶体获得高能量输出的皮秒绿光脉冲,但由于有机染料难以固化、稳定性差等缺点,使用起来很不方便。近年来, $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体作为一种新型固体可饱和吸收材料,具有稳定的物化特性、高损伤阈值、高抗应力能力、吸收截面大等特点,广泛应用于固体 Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub> 等激光器的调  $Q$  技术中<sup>[1-3]</sup>,但用于被动锁模的结果并不是很理想<sup>[4-7]</sup>,这与  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体激发态吸收饱和和光强高及损伤阈值的限制有关。

作者简介:袁易君(1976-),男,讲师,硕士,主要从事固体激光调  $Q$ 、锁模、大气光散射及单片机技术等方面的研究。

E-mail: yijunyan@126.com

收稿日期:2010-05-14;收到修改稿日期:2010-06-07

本文中采用  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体和声光锁模器进行脉冲抽运式 Nd:YAG 激光器的主被动联合锁模,可克服  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体和声光锁模器单独工作时稳定性差、锁模不完全等缺点,利用 KTP 晶体作为倍频器件获得皮秒绿光脉冲。

## 1 实验装置

$\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体和声光锁模主被动锁模 KTP 外腔倍频 Nd:YAG 绿光激光器实验装置如图 1 所示。采用的 Nd:YAG 晶体棒尺寸  $\varnothing 5\text{mm} \times 80\text{mm}$ ,  $M_1$  是对 1064nm 基频光全反的曲率半径为 300cm 的球面镜,  $M_2$  为输出耦合平面镜,  $M_3$  和  $M_4$  为 45° 倾斜放置全反镜,谐振腔光程长为 1500cm,采用殷钢固定以增加激光器的热稳定性,  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体尺寸为 10mm  $\times$  3mm,脉冲氙灯的重复率 1Hz,偏振片的尺寸为  $\varnothing 22.5\text{mm} \times 3\text{mm}$ ,半波片尺寸为  $\varnothing 20\text{mm}$ ,偏振片与半波片精密衰

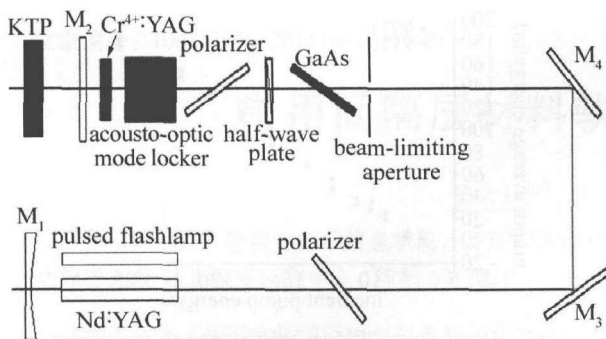


Fig. 1 The diagram of an actively-passively mode-locked laser

减,控制能量输出,GaAs为被动负反馈元件,孔径光阑用于改善光束输出质量,获得稳定的输出。

## 2 理论结构分析

将一同步损耗的声光驻波调制器插入纯被动锁模 YAG 激光器谐振腔内,称为主被动锁模 YAG 激光器,利用声光驻波调制器的动态调制窗口对噪声脉冲进行预整理,使其在进入锁模的非线性阶段时,已从一随机分布变成有利于锁模的新的强度分布,并使脉冲宽度得到进一步的压缩,最终得到理想的巨脉冲输出,使纯被动锁模 YAG 激光器的锁模几率、阈值特性、稳定度等性能得到明显的改进。

### 2.1 谐振腔设计

激光器采用谐振腔为平凹稳定腔<sup>[4]</sup>,根据下式来计算镜 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 上的光斑尺寸面积 W<sub>s,1</sub> 和 W<sub>s,2</sub>:

$$W_{s,1} = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left[ \frac{R_1^2 (R_2 - L)}{L(R_1 - L)(R_1 + R_2 - L)} \right]^{1/4} \quad (1)$$

$$W_{s,2} = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left[ \frac{R_2^2 (R_1 - L)}{L(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)} \right]^{1/4} \quad (2)$$

式中,R<sub>1</sub>为M<sub>1</sub>镜的曲率半径,R<sub>2</sub>为M<sub>2</sub>镜的曲率半径,L为谐振腔光程长,λ为激光波长,把R<sub>2</sub>=3m,R<sub>1</sub>=∞,L=1.5m,λ=1064nm代入(1)式和(2)式,得到W<sub>s,1</sub>=7.11cm<sup>2</sup>和W<sub>s,2</sub>=10.06cm<sup>2</sup>,光斑尺寸光束见图2。

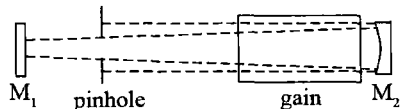


Fig. 2 Configuration of cavity

这种腔可以增大 Nd:YAG 晶体中的光斑面积,提高利用率,又可减小靠近 M<sub>1</sub> 镜放置的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体上的光斑面积。

### 2.2 实际腔长计算

声光锁模器的电源驱动频率 50MHz,根据下式:

$$f_m = c/(2L) \quad (3)$$

计算得到谐振腔的光程长 L=1500mm,式中,c为光

速,f<sub>m</sub>为声光锁模器的调制频率,f<sub>m</sub>=2×50MHz=100MHz。由于腔内 YAG 晶体、声光介质的晶体以及 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的折射率大于空气的折射率<sup>[8]</sup>,根据下式计算实际腔长 L<sub>g</sub>:

$$L_g = L - (n_{YAG} - n_0)l_{YAG} - (n_m - n_0)l_m \quad (4)$$

式中,n<sub>m</sub>为石英玻璃声光介质的折射率,n<sub>m</sub>=1.46,l<sub>m</sub>为其厚度,l<sub>m</sub>=10mm,n<sub>YAG</sub>为 Nd:YAG 晶体折射率,n<sub>YAG</sub>=1.82,l<sub>YAG</sub>为其厚度,l<sub>YAG</sub>=80mm,Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的厚度很薄,这里忽略其引起的变化,计算得到谐振腔实际的腔长 L<sub>g</sub>=1429.8mm。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动锁模

Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动锁模输出波形如图3所示,实验中

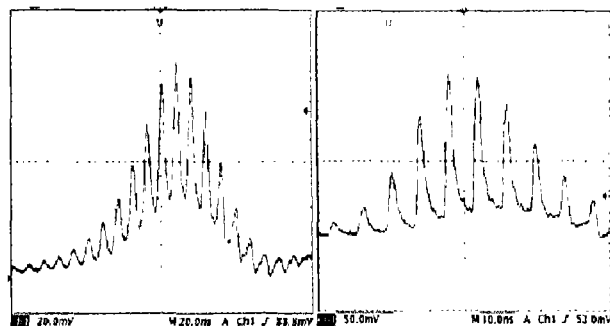


Fig. 3 Output pulse of passively mode locker

采用 300MHz 的数字存储示波器 TDS3032、快速硅 PIN 光电二极管测量输出锁模脉冲信号。Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体被动锁模时氙灯抽运阈值约为 6J。在阈值附近,出现明显的调 Q 脉冲,但只有微弱的锁模调制现象,调制深度较低、不稳定,波形变化很大。随着氙灯抽运电压增大,调制深度增加,锁模现象越发明显。当抽运能量增加到 20J 以上后,调制深度达到 90%,相应的调 Q 包络的脉冲宽度大约为 120ns,但再增加氙灯抽运能量,也不能实现完全锁模。调 Q 锁模脉冲波形幅值和能量随抽运能量增加而增加。此时 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的小信号透过率为 86%,输出耦合镜的透过率 T=15%。调制深度达不到 100%,可能因为腔内光强较弱,不足以使 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的激发态吸收(excited state absorption, ESA)效应完全起作用。

### 3.2 声光主动锁模

声光锁模器的驱动频率为 50MHz,调 Q 包络的脉冲宽度大约为 400ns,如图4所示。当氙灯的抽运能量超过阈值时,激光器便处于锁模运转,调制深度随着声光锁模器的频率与谐振腔腔长的匹配程度加深,当其较好匹配时,调制深度均能达到 80% 以上,调 Q 包络的脉冲宽度随抽运功率的增加变化幅度很小。图4是实验中的锁模脉冲包络。

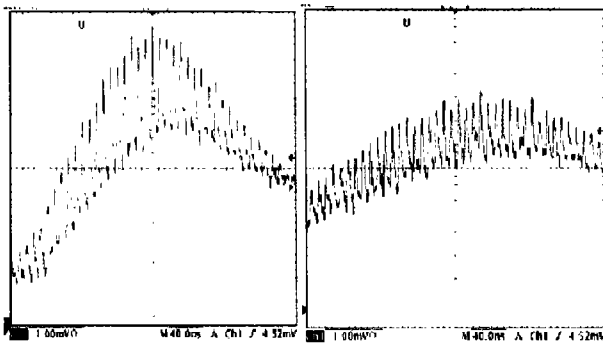


Fig. 4 Output pulse of actively mode locker

### 3.3 主被动锁模

当抽运功率超过阈值6J时,主被动锁模激光器便一直处于调Q锁模运转,调制深度均能达到100%。由图5可看出,锁模脉冲上升时间 $t_m \approx 1.3\text{ns}$ ,实验中

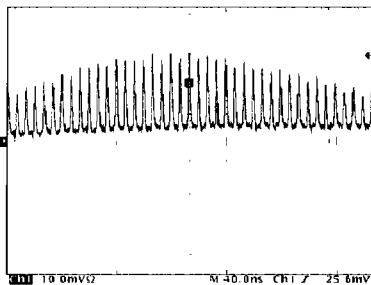


Fig. 5 Output pulse of actively-passively mode locker

使用的快速硅PIN上升时间 $t_{\text{PIN}} \approx 1\text{ns}$ ,使用的500MHz示波器的上升时间可由 $t_0 \times W = 0.35 \sim 0.4$ 给出<sup>[9]</sup>, $W$ 为测量示波器的带宽, $W = 500\text{MHz}$ ,利用实际上升时间 $t_r = \sqrt{t_m^2 - t_{\text{PIN}}^2 - t_0^2}$ ,可估算锁模脉冲实际上升时间约为360ps,假定脉冲为对称脉冲,根据上升时间定义可进一步估算锁模脉冲的实际宽度约为450ps。

图6中给出了不同声光调制频率下的调Q包络

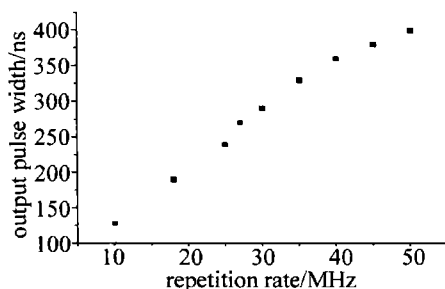


Fig. 6 Output pulse width of actively-passively mode locker

脉宽,随着调制频率的增加,调Q包络脉宽也随着增大,但是在相同的调制频率下,调Q包络脉宽不随抽运功率的增加而发生变化。

在 $T = 15\%$ , $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动锁模晶体的小信号透过率分别为86%和91%下,没有倍频,波长为1064nm的平均输出能量与抽运能量关系见图7。从图中可以看出,在小信号透过率为86%和91%的情况下,激光平均输出能量均随抽运功率线性增加,抽运能量约

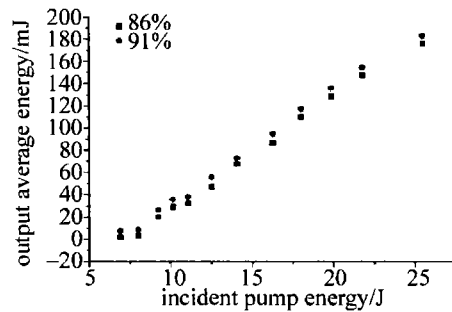


Fig. 7 Output energy 1064nm actively-passively mode locker

26J时,获得最高输出能量为187mJ和196mJ。当增加倍频晶体输出波长为532nm, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动锁模晶体的小信号透过率分别为86%和91%时,平均输出能量和抽运能量关系如图8所示,其最高输出能量分别为77.4mJ和81.1mJ,转换效率约为41%。

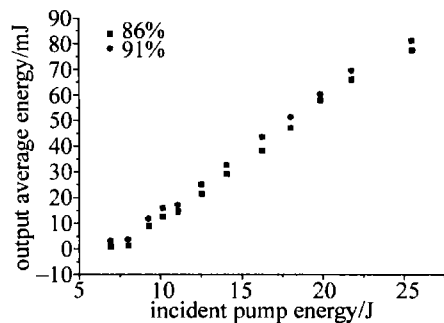


Fig. 8 Output energy at 532nm actively-passively mode locker

## 4 结论

通过对谐振腔结构的分析,采用平凹稳定腔,可增加激光振荡Nd:YAG晶体的利用率;对实际腔长进行计算,可快速定位声光锁模频率与谐振腔腔长的匹配位置。比较分析了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动锁模、声光锁模器主动锁模及两者联合主被动锁模3种情况下输出脉冲的特性,在 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体被动锁模时得到的锁模深度能达到90%,但锁模不完全,波形和能量稳定性不高,锁模包络脉宽为120ns。而主被动联合锁模克服了主动锁模脉冲能量低、被动调Q锁模稳定性差、锁模不完全的缺点,得到幅值和能量抖动小于 $\pm 5\%$ 、锁模深度100%、脉宽小于450ps、输出能量近200mJ、波长为1064nm的锁模脉冲,腔外增加KTP倍频晶体得到约41%的转换效率输出。

### 参考文献

- [1] PEI W H, SONG L J, SONG Y R, *et al.* Experiment study on  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  laser[J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(3): 177-179 (in Chinese).
- [2] ZHUO Zh, JIANG Q Ch, SU Y L, *et al.* LD-pumped Nd:Gd<sub>0.42</sub>Y<sub>0.58</sub>VO<sub>4</sub>/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  passively Q-switched mode-locking green laser[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(11): 1301-1303 (in Chinese).

(下转第417页)

Table 1 The multilayers with the highest reflectivity at soft X-ray

wavelength/nm	1.68 ~ 3.25	3.25 ~ 3.58	3.58 ~ 3.81	3.81 ~ 6.68	6.69 ~ 11.10	11.11 ~ 12.43	12.44 ~ 20
multilayer	Pt/Si <sup>[13]</sup>	W/Si <sup>[13]</sup>	Ni/Si <sup>[13]</sup>	U/C	U/B	Mo/Be	Mo/Si

从优化设计结果可知,在 1nm ~ 1.68nm 波段,这些材料中未能发现具有理想反射率的膜系。在小于 4.36nm 波段,最高反射率不超过 10%。在大于 20nm 波段,也未有明显特征反射峰。特别要指出的是,在同一波段,当间隔层材料一定时,多层膜的反射率与吸收层材料折射率  $n_a$  和间隔层材料折射率  $n_s$  的差值有关,见图 5。

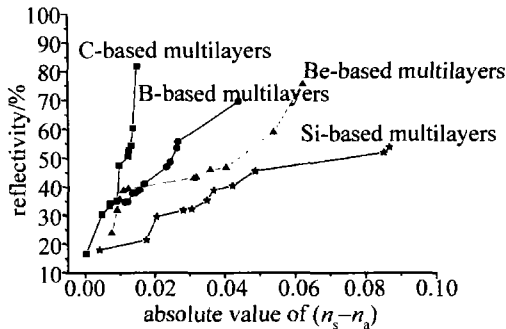


Fig.5 Relationship between reflectivity and refractive index difference of multilayer

从图中可以看出,同一波长处,多层膜的反射率随吸收层和间隔层材料折射率之差的绝对值的增加而增加,即多层膜的反射率与间隔层材料和吸收层材料的折射率有关,二者相差越大,反射率越高,这正是前面所叙述的多层膜选材原则。

### 3 结 论

设计结果表明,Mo 在相当大的波段范围内具有良好的光学特性。除了在 12.44nm 是首选膜系外(除 4.36nm 外),其它波长都有较高的反射率。U 作为吸收层材料,在相当大的波段范围内,与其它间隔层材料配对的多层膜也具有较高的反射率。

### 参 考 文 献

[1] BACK C A, AUFFMAN R L K, BELL P M, *et al.* Characterization

of nova plasmas using an X-ray spectrometer with temporal and spatial resolution[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(1): 764-766.

[2] SHEALY D L. Design and analysis of a Schwarzschild imaging multi-layer X-ray microscope[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(7): 721-727.

[3] SAYRE D. Potential operating region for ultrasoft X-ray microscopy of biological materials[J]. *Science*, 1977, 196(4296): 1399-1340.

[4] WALKER A B C, LINDBLOM J F, TIMOTHY J G, *et al.* The ultra high resolution XUV spectroheliograph [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(7): 699-710.

[5] GUTMAN G. High-performance Mo/Si and W/B<sub>4</sub>C multilayer mirrors for soft X-ray imaging optics[J]. *Journal of X-Ray Science Technology*, 1994, 4(2): 142-150.

[6] SKULINA K M, ALFORD C, BIOTA R M, *et al.* Molybdenum/Beryllium multilayer mirrors for normal incidence in the extreme ultraviolet[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(19): 3727-3730.

[7] STEARNS D G, ROSEN R S, VERNON S P. Normal-incidence X-ray mirror for 7nm[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(16): 1283-1285.

[8] MONTCALM C, SULLIVAN B T, DUGUAY S, *et al.* In situ reflectance measurements of soft-X-ray/extreme-ultraviolet Mo/Y multilayer mirrors[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(12): 1450-1452.

[9] SEELY J F, GUTMAN G, WOOD J, *et al.* Normal-incidence reflectance of W/B<sub>4</sub>C multilayer mirrors in the 34 ~ 50Å wavelength region [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(19): 3451-3543.

[10] FEDORENKO A I, KONDRATENKO V V, PERSHIN Y P, *et al.* Synthesis and measurement of normal incidence X-ray multilayer mirrors optimized for a photon energy of 390eV [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2012: 198-208.

[11] SONG M D, LI R J, ZHOU J L, *et al.* An new method to design high reflectivity film[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2000, 11(1): 62-64.

[12] SONG L M. Design and fabrication on soft X-ray multilayer mirror [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002: 12-15 (in Chinese).

[13] SHAO J D, YI K, FAN Zh X, *et al.* Theoretic design of multilayers for soft X-rays(1 ~ 30nm) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 26(12): 1127-1132 (in Chinese).

(上接第 414 页)

[3] WANG J Y, XUE Q H, ZHENG Q, *et al.* LD-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr:YAG passive Q-switching and mode-locking laser[J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(2): 112-114 (in Chinese).

[4] WANG J X, ZHANG W Zh, WANG Q Y, *et al.* Investigation on characteristics of Cr<sup>4+</sup>:YAG passive mode locking in a Nd:YAG laser with a plane concave cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 10(6): 508-511 (in Chinese).

[5] LI W, WANG J X, WANG J J, *et al.* Study on passive mode-lock of pulsed Nd:YAG laser with SESAM[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 296-298 (in Chinese).

[6] CHEN Y F, CAI S W. Simultaneous Q-switch and mode-locking in a

diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>-Cr<sup>4+</sup>:YAG laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(4): 580-586.

[7] CHEN Y F, LEE J L, HSIEH H D, *et al.* Analysis of passively Q-switched lasers with simultaneous mode-locking[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(3): 312-317.

[8] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 456-457 (in Chinese).

[9] LI M, ZHAO Sh Zh, YAGN K J, *et al.* Diode-pumped actively Q-switching and mode-locking Nd:GdVO<sub>4</sub> laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2008, 5(5): 722-725.