

# 脉冲 LDA 泵浦 Nd : YVO<sub>4</sub> / GaAs 被动调 Q 锁模激光器 \*

刘晓娟<sup>1</sup>, 傅汝廉<sup>2</sup>, 卓然然<sup>2</sup>, 薛兵招<sup>2</sup>, 方涛<sup>2</sup>

(1 山东理工大学 物理与光电信息技术学院, 山东 淄博 255049)

(2 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071)

**摘 要:**用脉冲激光二极管阵列(LDA)作为泵浦源、微柱透镜阵列和透镜导管作为耦合系统,以 As<sup>+</sup>注入 GaAs 可饱和吸收片作为被动调 Q 锁模元件,实现了 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器调 Q 锁模运转. 调 Q 运转阶段,激光器每泵浦脉宽内输出一个调 Q 脉冲,调 Q 脉宽 7ns. 调 Q 锁模运转阶段,初始透过率 60% 的 GaAs 晶片对调 Q 包络内的锁模脉冲的调制深度达到 95% 以上,锁模脉冲重复频率 991 MHz. 研究了加在 LDA 上的电压、方波脉冲的脉宽和重复频率对调 Q 锁模脉冲特性的影响,并对实验结果进行了讨论.

**关键词:**激光二极管阵列(LDA); As<sup>+</sup>离子注入 GaAs; 调 Q 锁模; Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)09-1578-4

## 0 引言

激光二极管(LD)或激光二极管阵列(LDA)泵浦的被动调 Q 或锁模固体激光器是获得纳秒、皮秒量级脉冲激光的理想光源,因其具有结构简单、体积小、效率高、成本低等优点,所以在非线性光学、光谱学、军事遥感、显微医学、微加工等领域有着广泛的应用前景并已获得快速的发展<sup>[1-3]</sup>. 当前实现全固态激光器被动调 Q 或锁模的材料主要有可饱和吸收体 Cr<sup>4+</sup>: YAG 以及诸多的半导体可饱和吸收体. 半导体材料 GaAs 深能级缺陷在 1.0 μm 附近的吸收跃迁过程具有可饱和特性,这使得 GaAs 材料可以用于激光器的被动调 Q 及锁模实验<sup>[4]</sup>. 1991、1992 年, Kubecek Vaclav 等<sup>[5]</sup> 和 Zhuhong Zhang 等<sup>[4]</sup> 分别用半导体材料 GaAs 实现了闪光灯泵浦 Nd : YAP(YALO<sub>3</sub>) 和 Nd : YAG 的被动锁模激光器. 1996 年, T. T. Kajava 等<sup>[6]</sup> 用半导体材料 GaAs 实现了连续 LD 泵浦 Nd : YAG 被动调 Q 激光器. 从此,饱和吸收体 GaAs 实现的连续 LD 泵浦固体激光器的被动调 Q 或锁模以及调 Q 锁模实验相继被报道<sup>[4,7]</sup>. 与其它半导体可饱和吸收体相比, GaAs 具有损伤阈值高,损耗低,易加工的优点,不仅被广泛用于中小功率泵浦的调 Q 或锁模激光系统,还可应用于高功率泵浦的调 Q 或锁模激光系统.

本文以脉冲 LDA 作为泵浦源,利用具有大增益带宽的 Nd : YVO<sub>4</sub> 为激光介质,以微柱透镜阵列和透镜导管作为耦合系统,采用平-平腔结构,以

As<sup>+</sup>离子注入 GaAs 作为饱和吸收体,实现了脉冲 LDA 泵浦 Nd : YVO<sub>4</sub> / GaAs 被动调 Q 锁模激光器. 调 Q 运转阶段,激光器每泵浦脉宽内只输出一个调 Q 脉冲,实验获得最小调 Q 脉宽 7ns. 适当增大泵浦功率时,实现了调 Q 锁模脉冲输出. 实验中用初始透过率 60% 的 GaAs 晶片使调 Q 包络内锁模脉冲的调制深度达到了 95% 以上,调 Q 包络内锁模脉冲重复频率 991 MHz. 对加在 LDA 上的电压、方波脉冲的脉宽和重复频率对调 Q 锁模脉冲特性的影响进行了深入的研究,并对实验结果进行了讨论.

## 1 调 Q 锁模激光器实验装置

如图 1, LDA 被固定在铜热沉上,通过水循环将其温度控制在 20℃ 左右,发射光中心波长 808 nm,由脉冲电源驱动. 脉冲电源输出方波脉冲的电压、脉宽和重复频率连续可调. 微柱透镜阵列和透镜导管组成耦合系统,将 LDA 发射的大面积泵浦光压缩并传输到激光工作介质 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体的输入端面<sup>[8]</sup>. Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体的尺寸为 4×4×8 mm<sup>3</sup>,

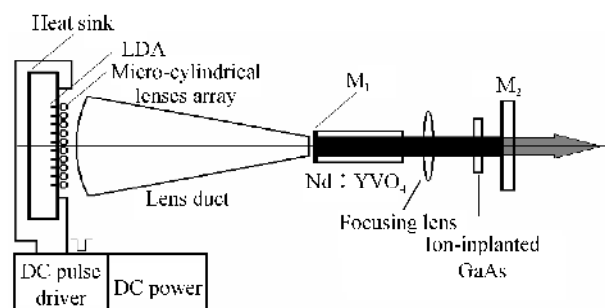


图 1 LDA 泵浦 GaAs 被动调 Q 锁模 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of LDA pumped GaAs passively Q-switched mode locked Nd : YVO<sub>4</sub> laser

\* 国家自然科学基金(60577015)资助

Tel: 022-23503195 Email: liuxjuan@mail.nankai.edu.cn  
收稿日期: 2006-04-25

掺杂浓度为 0.27at%, 晶体一端镀 808 nm 增透膜和 1 064 nm 全反膜作为激光全反镜 M<sub>1</sub> 并与输出镜 M<sub>2</sub> 构成平-平谐振腔, 另一端镀 1 064 nm 增透膜. 透镜焦距 5 cm. 可饱和吸收体 As<sup>+</sup> 离子注入 GaAs 厚 500 μm. 输出耦合镜表面镀 1064 nm 高反膜, 反射率 85%. 激光器谐振腔总长度为 15 cm. 实验中用 LPE-IB 型激光功率能量计测量激光脉冲能量, 采用快速响应 PIN 管和 TECHTRONIX TDS 520C 存储示波器观测激光脉冲信号.

## 2 实验结果与讨论

首先选择初始透过率为 75% 的 GaAs 晶片, 将 LDA 的泵浦脉冲宽度和重复频率分别调至 200 μs、20 Hz, 通过增大加在 LDA 上的电压逐渐增大泵浦脉冲能量至 15.5 μJ 时, 实现了每泵浦脉宽输出单调 Q 脉冲运转. 当泵浦能量增大到 2.4 mJ 时, 所得调 Q 脉冲宽度 7ns, 如图 2. 图 3 为此时调 Q 脉冲序列, 反映出调 Q 脉冲具有良好的稳定性. 适当增

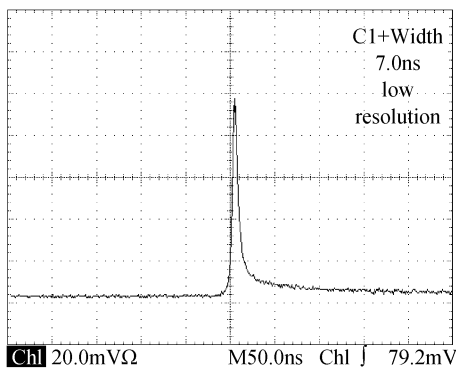


图 2 宽度 7 ns 的调 Q 脉冲  
Fig. 2 The Q-switching pulse with the pulse width being 7 ns

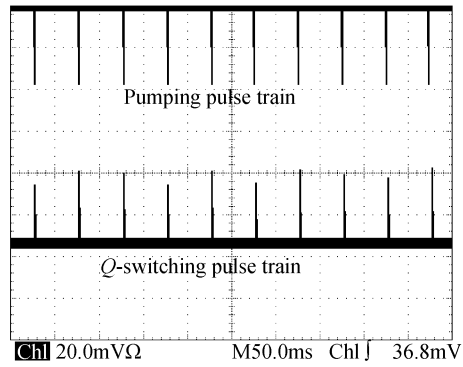


图 3 泵浦脉冲序列与对应的调 Q 序列  
Fig. 3 Oscilloscope trace of a pulse train and the corresponding pumping pulse

大泵浦功率时, 调 Q 包络内出现了锁模脉冲. 随泵浦功率的进一步增大, 锁模脉冲的调制深度有所增加但不明显, 当泵浦能量为 2.8 mJ 时, 所得调 Q 锁模激光脉冲如图 4(a). 继续增大泵浦能量达 3.2 mJ 时, 激光器在一次泵浦脉宽内输出多调 Q 脉冲. 这一现象说明此晶片作为调 Q 锁模器件, 因其初始透过率太大而导致锁模的调制深度不够. 为了获得更好的调 Q 锁模脉冲输出, 换用初始透过率为 60% 的 GaAs 晶片, 在同样的泵浦条件下, 获得了调制深度 95% 以上的调 Q 锁模激光脉冲输出, 如图 4(b). 调节示波器得到调 Q 包络内部分锁模脉冲序列如图 4(b'). 该图显示, 调 Q 包络内锁模脉冲的重复频率为 991 MHz, 根据锁模脉冲周期与谐振腔腔长的关系可以确定, 实验中所获得的现象就是调 Q 锁模现象; 在示波器显示准确度为 2 ns/div 的情况下, 锁模脉冲的脉宽显示尚不明显, 说明锁模脉冲的宽度是很小的. 限于实验室当前的条件, 调 Q 包络内锁模脉冲的宽度尚不能测量.

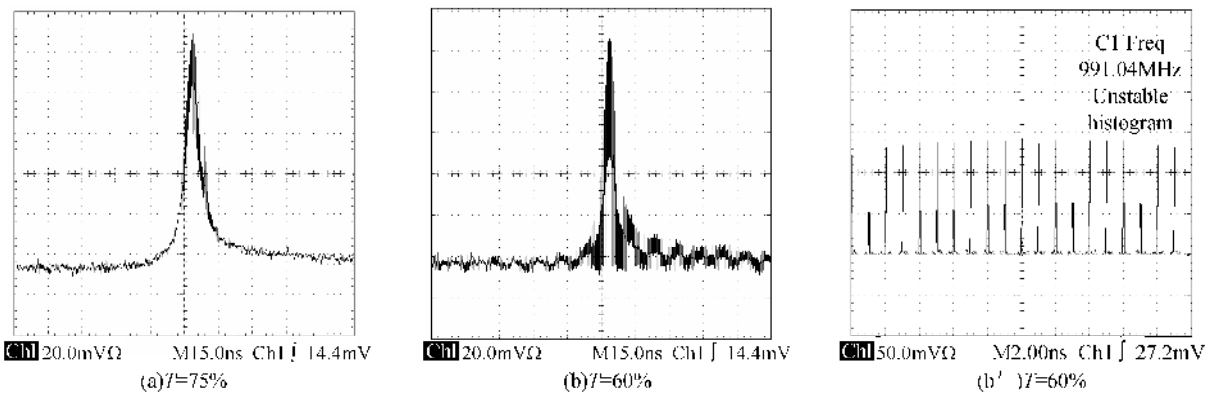


图 4 LDA 泵浦 GaAs 被动调 Q 锁模 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出的调 Q 锁模脉冲(a)、(b), 锁模脉冲序列(b)  
Fig. 4 Oscilloscope traces of a Q-switched and mode-locked laser pulse(a)、(b) and mode locked pulses train(b')

选用初始透过率 60% 的 GaAs 晶片, 实验测量了泵浦脉冲能量、脉宽、重复频率对调 Q 锁模脉冲特性的影响. 首先保持泵浦脉冲的重复频率、脉冲宽度分别为 20 Hz、200 μs, 通过调节加在 LDA 上的电压来改变泵浦脉冲的能量. 随泵浦脉冲能量变

大, 调 Q 锁模脉冲能量变大, 如图 5; 调 Q 包络的宽度无明显变化. 保持加在 LDA 上的电压和方波脉冲的重复频率分别为 17.0 V、20 Hz, 增大泵浦脉宽, 调 Q 锁模脉冲的能量变大, 如图 6; 调 Q 脉冲包络宽度随泵浦脉宽的增大而减小. 保持加在 LDA

上的电压和方波脉冲的脉宽  $17.0\text{V}$ 、 $200\mu\text{s}$  不变,增大泵浦脉冲重复频率,除了调 Q 脉冲的重复频率随之增大外,调 Q 脉冲包络宽度随泵浦重复频率的增大而变宽,调 Q 锁模脉冲的能量没有明显变化。

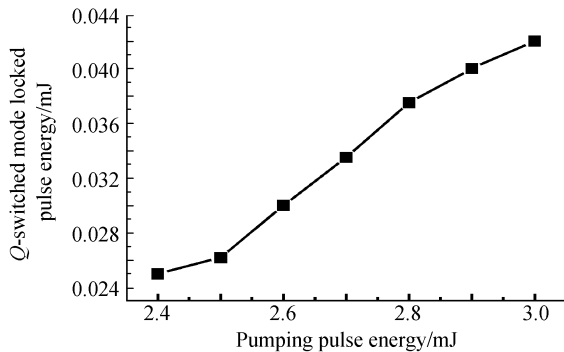


图 5 调 Q 锁模脉冲能量随泵浦脉冲能量的变化关系  
Fig. 5 Q-switched mode locked pulse energy with the pumping pulse energy

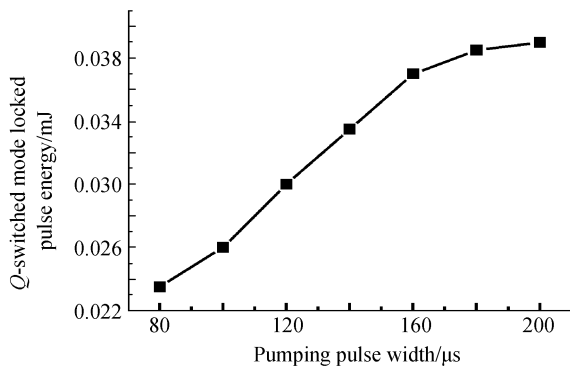


图 6 调 Q 锁模脉冲能量随泵浦脉宽的变化关系  
Fig. 6 Q-switched mode locked pulse energy with the pumping pulse width

实验中没有观察到 GaAs 晶片的光损伤以及明显的温度升高。

从实验结果可以看出,对于脉冲 LDA 泵浦的调 Q 锁模激光器来讲,与连续 LD 泵浦的调 Q 锁模激光器不同<sup>[7]</sup>,增大泵浦脉冲的能量,对于增大调 Q 包络内锁模脉冲的调制深度来讲效果不明显。相比之下,可饱和吸收体的初始透过率是决定调制深度的关键因素,在保证激光器处于调 Q 锁模运转的前提下,GaAs 晶片的初始透过率越小,调 Q 包络内锁模脉冲的调制深度越大。另外,从图 4 可以看出,在调 Q 包络最大强度处,调 Q 锁模脉冲的峰值远比调 Q 脉冲的峰值高,调制深度越大此现象就越明显。这说明 Nd:YVO<sub>4</sub> 具有大的增益带宽,对于通过锁模运转获得高功率的超短脉冲来讲是非常有利的。

### 3 结论

本文在脉冲 LDA 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器中,用半导体材料 As<sup>+</sup> 离子注入 GaAs 成功实现了被动

调 Q 锁模运转。激光器调 Q 运转阶段,输出调 Q 脉冲宽度为 7 ns,每泵浦脉宽内只产生一个调 Q 脉冲且脉冲序列稳定性良好。随着泵浦功率提高,利用合适透过率的 GaAs 晶片实现了激光器的调 Q 锁模运转,获得了窄脉宽锁模脉冲,调 Q 包络内锁模脉冲的调制深度达到 95% 以上,锁模脉冲重复频率 991MHz。实验结果结合以前的文献说明,离子注入的 GaAs 材料具有足够的调制深度,能够良好地实现 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的调 Q 或调 Q 锁模运转。

#### 参考文献

- [1] YANG Ke-jian, ZHAO Sheng-zhi, ZHAO Hong-ming, *et al.* Theoretical and experimental study of a laser-diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> Laser with GaAs saturable absorber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 169-172.  
杨克建, 赵圣之, 赵宏明, 等. LD 泵浦晶体被动调 Q 激光理论和实验研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(2): 169-172.
- [2] WANG Yong-gang, MA Xiao-yu, JU Gui-fang, *et al.* Passive Q-switched modelocking diode-end-pumped Yb:YAG with surface-state type of semiconductor saturable absorption mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 11-13.  
王勇刚, 马晓宇, 居桂方, 等. 用表面态型半导体可饱和吸收镜实现 Yb:YAG 激光器被动调 Q 锁模[J]. 光子学报, 2005, **34**(1): 11-13.
- [3] YU Hai-juan, LI Gang, Chen Meng, *et al.* LD pumped Yb:YAG mode-locked laser with SESAM [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 648-651.  
于海娟, 李港, 陈檬, 等. 用半导体可饱和吸收镜进行 LD 泵浦 Yb:YAG 激光器被动锁模研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(5): 648-651.
- [4] ZHANG Z H, QIAN L J, FAN D Y, *et al.* Gallium arsenide: A new material to accomplish passively mode-locked Nd:YAG laser[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, **60**(4): 419-421.
- [5] CHEN Y F, HUANG K F, TSAI S W, *et al.* Simultaneous mode locking in a diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a GaAs saturable absorber [J]. *Applied Optics*, **40**(33): 6038-6040.
- [6] KAJAVA T T, GAETA A L. Q-switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with GaAs[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(16): 1244-1246.
- [7] JIANG Qi-chang, ZHUO Zhuang, Li Jian, *et al.* Study of passively Q-switched mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> infrared laser pumped by diode laser with GaAs absorber grown at low temperature[J]. *Infrared*, 2005, **4**: 1-4.  
姜其畅, 卓壮, 李建, 等. 低温生长 GaAs 实现半导体泵浦红外激光器被动调 Q 锁模研究[J]. 红外, 2005, **4**: 1-4.
- [8] LIU Xiao-juan, FU Ruan-lian, QIN Hua, *et al.* Theoretical and experimental research on lens duct for LDA coupling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 237-242.  
刘晓娟, 傅汝廉, 秦华, 等. LDA 耦合系统透镜导管的理论与实验研究[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(2): 237-242.

## Pulse LDA-pumped Passively Q-switched Mode Locked Nd : YVO<sub>4</sub> Laser with a GaAs Saturable Absorber

LIU Xiao-juan<sup>1</sup>, FU Ru-lian<sup>2</sup>, ZHUO Ran-ran<sup>2</sup>, XUE Bing-zhao<sup>2</sup>, FANG Tao<sup>2</sup>

(1 School of Physics and Opto-electronic Information Technology, Shandong University of Technology,  
Shandong Zibo 255049, China)

(2 Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Received date: 2006-04-25

**Abstract:** A passively Q-switched pulse-LDA (laser diode array)-pumped Nd : YVO<sub>4</sub> laser using As<sup>+</sup> implanted GaAs as a saturable absorber is demonstrated. In the Q-switching experiment, the laser produces one Q-switching pulse in every pumping pulse duration and a Q-switching pulse width 7 ns is achieved which, to our knowledge, is the shortest pulse width in a passively Q-switched Nd : YVO<sub>4</sub> laser using GaAs as saturable absorber. In the Q-switching mode locking experiment, using a 60% initial transmission GaAs wafer, the modulation depth of larger than 95% and the repetition rate of 991 MHz of the mode locked pulses in the Q-switched envelope are obtained. The characteristics of the Q-switched mode locked pulses by varying the pumping pulse amplitude, pulse width and repetition rate are investigated respectively. The experimental results are discussed as well.

**Key words:** Diode laser array (LDA); As<sup>+</sup> ion-implanted GaAs; Q-switching mode locking; Nd : YVO<sub>4</sub> crystal



**LIU Xiao-juan** was born in 1976 in Shandong Province. She is pursuing her Ph. D. in Institute of Modern Optics of Nankai University now. Her major is in the field of all solid-state lasers.