

文章编号: 0253-2239(2006)01-0077-4

低温 GaAs 被动调 Q 锁模 Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ 混晶激光器特性研究*

卓 壮^{1,2} 姜其畅¹ 王勇刚³ 苏艳丽¹ 李 涛¹ 李 建¹

1 山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014
2 山东大学山大鲁能信息科技有限公司, 济南 250100
3 中国科学院半导体研究所, 北京 100083

摘要: 采用低温生长 GaAs 晶体作为被动饱和吸收体兼输出镜, 实现了 Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ 混晶激光器的调 Q 锁模运转。研究了 Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ 激光器的基频运转特性。在输出镜透射率 $T=10\%$ 、腔长 $L=40$ mm 的情况下, 当抽运功率为 8.6 W 时, 获得激光输出功率 3.78 W, 光-光转换效率为 43.9%。并测量了 Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ 混晶被动调 Q 激光器的输出特性。实验结果表明激光器调 Q 运转阈值为 2 W, 当抽运功率为 3.7 W 时, 激光器出现调 Q 锁模行为; 当抽运功率为 8.6 W 时, 激光器调 Q 锁模深度达 70% 以上, 对应的脉冲包络重复频率为 670 kHz, 半峰全宽为 180 ns, 平均输出功率为 1.35 W, 光-光转换效率为 15.7%。

关键词: 激光器; Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ 混晶; 低温 GaAs 晶体; 调 Q 锁模; 激光二极管抽运

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Study on the Property of Passively Q-Switched Mode-Locked Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ Mixed Crystal Laser with GaAs Absorber Grown at Low Temperature

Zhuo Zhuang^{1,2} Jiang Qichang¹ Wang Yonggang³ Su Yanli¹ Li Tao¹ Li Jian¹

1 College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014
2 Shanda Luneng Information & Technology Co. Ltd, Shandong University, Jinan 250100
3 Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083

Abstract: Passively Q-switched mode-locking Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ laser is successfully demonstrated by using a piece of GaAs crystal grown at low temperature (LT-GaAs) as the passively saturated absorber as well as the output coupler. The fundamental properties of Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ laser are investigated. At transmission of 10% and cavity length of 40 mm, the maximum average output power of 3.78 W is obtained when the incident laser pumping power is 8.6 W, which corresponds to an optical-optical conversion efficiency of 43.9%. The output performance is then tested for the passively Q-switched Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ mixed crystal laser. The threshold power for Q-switching and Q-switching mode-locked (QML) are about 2 W and 3.7 W respectively. At the incident laser pumping power of 8.6 W, Q-switching mode-locking pulse with modulation depth more than 70% is available. The Q-switched envelope train with repetition rate of 670 kHz is obtained with pulse duration of 180ns. The average output power and the optical-optical conversion efficiency are 1.35 W and 15.7%, respectively.

Key words: lasers; Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄; GaAs grown at low temperature; Q-switched mode-locking; laser diode pumping

* 山东省科技厅科技攻关计划(031080125)资助课题。

作者简介: 卓 壮(1967~), 男, 山东大学教授, 主要从事新型光学晶体、非线性光学晶体和激光晶体、半导体激光抽运固体激光器和晶体器件的非线性光学特性等的研究。E-mail: z. zhuo@sdu.cn

收稿日期: 2005-03-09; 收到修改稿日期: 2005-04-25

1 引 言

掺钕钒酸盐晶体 Nd:YVO_4 、 Nd:GdVO_4 由于具有良好的物理化学和激光性能,被广泛应用于半导体抽运的全固态激光器上。这两种晶体在脉冲激光领域,尤其是在被动锁模的超短脉冲领域获得了很大成功^[1,2]。最近在 Nd:YVO_4 、 Nd:GdVO_4 的基础上,一种新的钒酸盐晶体 $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$ 逐渐引起了人们的注意^[3]。 $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$ 是由 Y(Gd) 部分地代替 Nd:GdVO_4 (Nd:YVO_4) 中的 Gd(Y) 形成的,三种晶体具有相同的晶体结构,它们的吸收波长中心都在 808 nm 附近。 $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$ 也有自身的一些特点。就荧光线条宽而言, $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$ (一般大于 2 nm) 约是 Nd:YVO_4 、 Nd:GdVO_4 (一般为 1 nm 左右) 的两倍; $\text{Nd:Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$ 还具有相对较小的发射截面和相对较大的上能级寿命。这些特点使它在脉冲激光领域得到了科研工作者的重视^[4,5]。

本文中,我们采用低温生长的 GaAs 材料作为一种新型的饱和吸收体,它的锁模原理与 GaAs 晶片相似,但是锁模质量比 GaAs 晶片高,价格和制作难度介于 GaAs 晶片和半导体饱和吸收镜之间^[6,7]。与半导体可饱和吸收镜一样,LT-GaAs 吸收体参量不但可以调节,同时还克服了可饱和吸收体内应力大的缺点,这样就大大延长了该种吸收体的使用寿命和抗光损伤阈值。我们使用这种新型 GaAs 吸收体实现了半导体抽运 $\text{Nd:Gd}_{0.42}\text{Y}_{0.58}\text{VO}_4$ 激光器被动调 Q 锁模运转。实验观察到 $\text{Nd:Gd}_{0.42}\text{Y}_{0.58}\text{VO}_4$ 调 Q 锁模运转阈值 3.7 W,当抽运功率为 8.6 W 时,平均输出功率 1.35 W,锁模调制深度达 70% 以上,相应的脉冲包络重复频率 670 kHz,半峰全宽 180 ns。

2 LT-GaAs 的生长结构与锁模原理

本实验中所用的 LT-GaAs(低温生长 GaAs) 吸收镜由中国科学院半导体所提供,其基本结构如图 1 所示。在半绝缘 GaAs 衬底(厚为 0.5 mm) 上采用金属有机气相淀积外延的方法低温生长吸收层 GaAs,

生长温度为 550 °C,厚度为 3 μm 。为了将 LT-GaAs 被动锁模吸收体设计成输出镜的结构,在 LT-GaAs 的外延面镀上 1064 nm 增透膜,并在 GaAs 的衬底面上镀制 1064 nm 高反射膜(七对 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$),实验测定其在 1064 nm 处透射率为 10%。

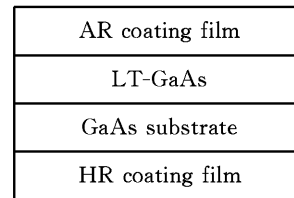


图 1 LT-GaAs 的生长结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of LT-GaAs absorber

LT-GaAs 被动锁模吸收体的吸收区与透射式半导体可饱和吸收镜 LT- $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 吸收区生长制备方法类似,只是前者可以生长的吸收层较厚,而且二者的锁模原理也有所区别^[7]。LT- $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 是利用带间跃迁吸收入射光并产生光生载流子,光生载流子通过低温生长引入的缺陷复合进行快速弛豫恢复。当光入射到可饱和吸收体上时,载流子受到激发占据上能级,当上能级的粒子数饱和以后,吸收体便被漂白。半导体的吸收有两个特征弛豫时间:带内热平衡弛豫时间(一般为 fs 量级)和带间跃迁弛豫时间(一般为 ps 量级)。通过改变吸收体的生长温度可以改变带间跃迁弛豫时间。一般说来,生长温度越低,在半导体内引入的缺陷越多,从而获得更短的带间跃迁弛豫时间。而 LT-GaAs 利用低温生长产生的缺陷能级来产生光生载流子,产生的这些光生载流子也通过这些缺陷进行快速弛豫恢复。

3 实验装置

实验所采用的装置如图 2 所示。抽运源为美国相干公司生产的激光二极管(型号 FAP-System),发射波长为 808 nm,最大输出功率为 30 W,通过光纤耦合输出。光纤输出孔径为 800 μm ,聚焦耦合系统的效率为 86%,聚焦后的束腰半径为 320 μm 。输入镜

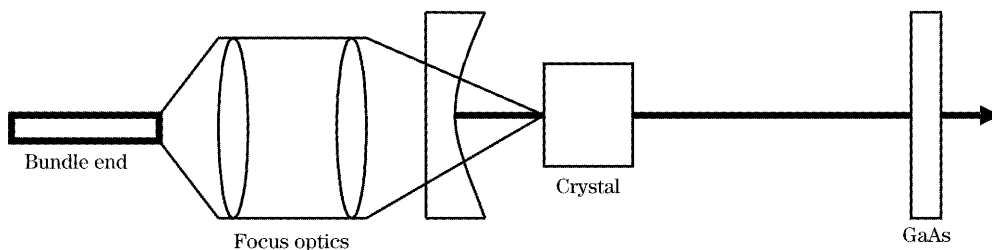


图 2 $\text{Nd:Gd}_{0.42}\text{Y}_{0.58}\text{VO}_4$ 激光器调 Q 锁模实验装置

Fig. 2 Experimental setup of passive-Q-switched-mode-locked $\text{Nd:Gd}_{0.42}\text{Y}_{0.58}\text{VO}_4$ laser

的曲率半径为 200 mm,外表面镀有 808 nm 的增透膜,内表面镀有 808 nm 的增透膜及 1064 nm 的高反膜。Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm,沿 a 轴切割,Nd³⁺ 离子掺杂原子数分数为 0.5%,晶体两面镀 808 nm 和 1064 nm 双色增透膜,为了尽可能减轻晶体的热效应,晶体用铝箔包裹,放在一块紫铜水冷装置中。低温生长 GaAs 作为耦合输出镜置于一可微调的平台上。

4 实验结果与分析

实验中用 NEW FOCUS 1623 快速硅光电二极管接收所产生的激光脉冲,用 Tektronix 公司的 TDS5104 示波器记录各阶段的波形,用 LP-3C 型激

光功率计测量平均输出功率。

首先用输出平镜代替 LT-GaAs,研究了 Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ 激光器的基频运转特性。在输出镜的透射率分别为 10%、4%,腔长分别为 $L=40$ mm,65 mm,80 mm 的各种可能组合下,测量了激光器的工作特性。各种情况下输出功率与抽运功率之间的关系如图 3 所示。

在输出镜透过率 $T=10\%$ 的情况下,激光器的光-光转换效率较高。抽运功率 8.6 W 时($L=40$ mm),最大输出功率 3.78 W,光-光转换效率 43.9%。实验说明 Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ 作为一种新型的激光增益介质有着良好的运转性能。

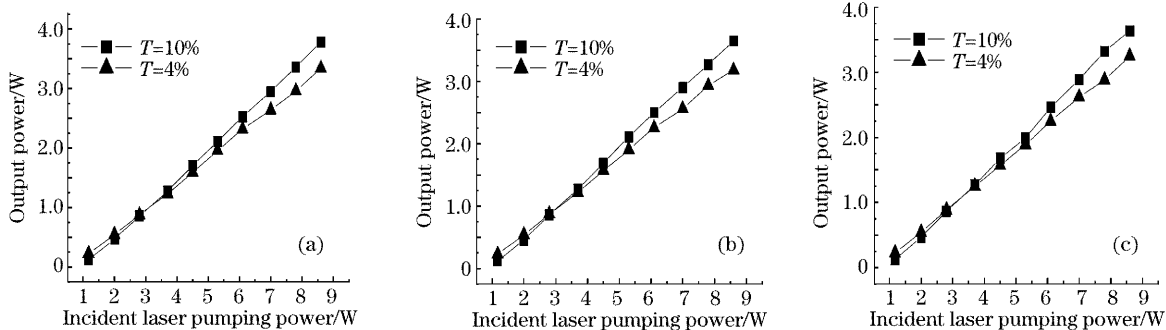


图 3 连续波输出功率与抽运功率的关系。(a) $L=40$ mm, (b) $L=65$ mm, (c) $L=80$ mm

Fig. 3 Relation of the CW output power versus the incident laser pumping power. (a) $L=40$ mm, (b) $L=65$ mm, (c) $L=80$ mm

根据 Nd:Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄ 的基频运转情况和谐振腔的分析,我们采用 $L=65$ mm 的平凹直腔进行 LT-GaAs 调 Q 实验。得到的平均输出功率与抽运功率之间的关系如图 4 所示。

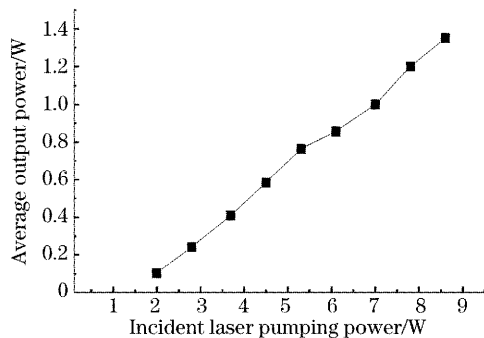


图 4 平均输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 Relation of the average output power versus the incident pump power

实验中 LT-GaAs 的调 Q 阈值约为 2 W。抽运功率 3.7 W 时,调 Q 脉冲的顶部开始分裂,即出现调 Q 锁模运转(见图 5)。随着抽运功率的增加,锁

模调制深度不断加大,脉冲包络逐渐变窄。当抽运功率 8.6 W 时,调 Q 锁模深度达 70% 以上,脉冲包络的重复频率为 670 kHz,半峰全宽为 180 ns(如图 6 所示),激光平均输出功率为 1.35 W,光-光转换效率 15.7%。从图中可以看出,调 Q 锁模脉冲比较稳定。由于实验条件所限,我们未能测出锁模脉冲的宽度。

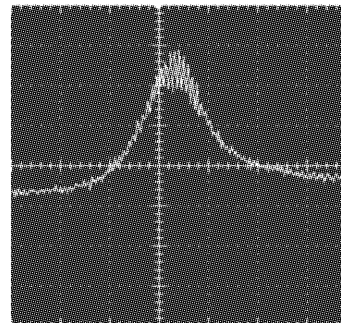


图 5 3.7 W 时调 Q 锁模脉冲

Fig. 5 Q-switched-mode-locked pulse shape ($P_{in}=3.7$ W)

实验未能实现连续锁模。我们认为主要有两方

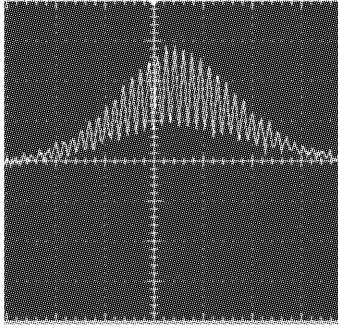


图 6 8.6 W 时调制深度为 70% 的调 Q 锁模脉冲

Fig. 6 Q-switched-mode-locked pulse shape with the modulation depth more than 70% ($P_m = 8.6$ W)

面的原因:一是入射到 LT-GaAs 上的光斑太大(约 $150 \mu\text{m}$),达不到连续锁模所要求的功率密度^[8]。另一方面,所用 LT-GaAs 的吸收层比较厚,达 $3 \mu\text{m}$ (LT-InGaAs 的吸收层一般只有 10 nm),这加大了 LT-GaAs 作为可饱和吸收体的非饱和损耗,进而提高了它的锁模阈值并对激光器的效率产生不利的影响。所以在生长温度及衬底类型相同的情况下,LT-GaAs 更易工作在调 Q 锁模的状态下。下一步,我们将进一步优化谐振腔参量,以期获得较好的结果。

5 结 论

采用 LT-GaAs 作为被动饱和吸收体兼输出镜,利用简单的平凹短腔实现了 $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.42}\text{Y}_{0.58}\text{VO}_4$ 混晶的调 Q 锁模运转。在抽运功率 8.6 W 时,得到了调制深度 70% 以上的调 Q 锁模脉冲,脉冲包络的

重复频率 670 kHz,半峰全宽 180 ns,激光平均输出功率为 1.35 W,光-光转换效率 15.7%。实验结果表明 $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.42}\text{Y}_{0.58}\text{VO}_4$ 混晶在超快脉冲领域预计有着良好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Juan Du, Jingliang He, Jie Liu *et al.*. Q-switching mode-locked diode-pumped $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ laser with a saturable Bragg reflector[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(5): 275~277
- 2 Bingyuan Zhang, Gang Li, Meng Chen *et al.*. Comparative study of the mode-locking of $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ and $\text{Nd}:\text{YAG}$ lasers with semiconductor saturable absorber mirrors[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(8): 477~479
- 3 Zhang Lianhan, Hang Yin, Sun Dunlu *et al.*. Spectral properties of $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.5}\text{Y}_{0.5}\text{VO}_4$ crystal[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 339~341 (in Chinese)
张连翰, 杭 寅, 孙敦陆 等. $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.5}\text{Y}_{0.5}\text{VO}_4$ 晶体光谱特性[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 339~341
- 4 Junhai Liu, Zhengping Wang, Xianlin Meng *et al.*. Improvement of passive Q-switching performance reached with a new Nd-doped mixed vanadate crystal $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.64}\text{Y}_{0.36}\text{VO}_4$ [J]. *Opt Lett.*, 2003, **28**(23): 2330~2332
- 5 Jingliang He, Yaxian Fan, Juan Du *et al.*. 4-ps passively mode-locked $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.5}\text{Y}_{0.5}\text{VO}_4$ laser with a semiconductor saturable-absorber mirror[J]. *Opt Lett.*, 2004, **29**(23): 1~3
- 6 J. Kong, D. Y. Tang, S. Ng *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ laser with a GaAs saturable absorber mirror[J]. *Appl. Phys. (B)*, 2004, **79**(2): 203~206
- 7 Jia Yulei, Wei Zhiyi, Zheng Jiaan *et al.*. Diode-pumped self-starting mode-locked $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ laser with semiconductor saturable absorber output coupler[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(11): 2209~2211
- 8 Ursula Keller, Kurt J. Weingarten, Franz X. Kartner *et al.*. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 1996, **2**(3): 435~436