

低温生长 GaAs 在 Nd : YVO₄ 激光器中 调 Q 特性的研究 *

姜其畅¹ 卓 壮^{1,2**} 王勇刚³ 李 健¹ 苏艳丽¹
马骁宇³ 张志刚⁴ 王清月⁴

(1 山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

(2 山大鲁能科技有限责任公司, 济南 250100)

(3 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(4 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光实验室, 天津 300072)

摘 要 采用一种新型的被动调 Q 饱和吸收体, 低温生长 GaAs 薄膜, 实现了半导体抽运 Nd : YVO₄ 激光器的调 Q 运转. 研究了激光器的调 Q 特性, 调 Q 抽运阈值为 2W. 在抽运功率 9.2 W 时, 获得的最短脉冲半峰全宽为 15 ns, 最大单脉冲能量为 4.84 μ J, 最高峰值功率为 330 W, 最大平均输出功率为 1.16 W; 脉冲重复频率在 220 kHz 到 360 kHz 之间.

关键词 低温生长 GaAs; 被动调 Q; Nd : YVO₄ 激光器; 半导体抽运

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

0 引言

纳秒脉冲激光在激光测距、激光制导、激光雷达等领域中发挥着关键的作用. 全固态被动调 Q 技术的抗电干扰能力强、体积小、重量轻、转换效率高、寿命长等优点引起了人们极大的兴趣, 成为固体激光器研究的一个重要方向. 目前用于 1.064 μ m 激光被动调 Q 吸收体的材料主要有两大类: 一类是 Cr⁴⁺ : YAG 可饱和吸收晶体^[1,2]; 一类是半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorption mirror, SESAM)、GaAs 晶片^[3] (通常是半绝缘的 GaAs 衬底) 等半导体吸收体. 20 世纪 90 年代以来, 国内外科研人员对 Cr⁴⁺ : YAG 晶体的被动调 Q 特性进行了大量研究^[1,2], 目前该类器件已经实现了产品化. 但是, Cr⁴⁺ : YAG 晶体作为被动调 Q 吸收体的固有参量, 如调制深度、恢复时间等的控制工艺复杂. 同一时期, 瑞士的 U. Keller^[4~6] 发明了一系列 SESAM 器件用于固体激光器和光纤激光器的被动锁模, 实现了皮秒和飞秒脉冲激光输出. 90 年代中期 U. Keller^[7,8] 制作的调 Q 用 SESAM 器件又成功实现了固体激光器和光纤激光器的被动调 Q 工作, 和常规的被动调 Q 技术相比, 脉冲宽度要短得多. 1999 年采用 SESAM 器件实现了 Nd : YVO₄ 激光器的被动调 Q, 脉冲宽度最短为 37 ps^[9], 这是迄今为止固体激光器通过调 Q 技术获得的最短脉冲宽度. 但是, 固体激光器调 Q 用 SESAM 器件与

锁模用 SESAM 器件有很大的不同. 调 Q 用 SESAM 器件的吸收区需要数百纳米厚度. 对波长为约 1 μ m 激光的吸收镜来说, 需要采用几十个 In_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs 量子阱作为吸收区. 由于 In_{0.25}Ga_{0.75}As 与 GaAs 晶格不匹配, 容易在衬底和量子阱之间产生应力, 造成材料生长困难、损坏吸收镜、降低使用寿命.

本文研究的低温生长 GaAs (LT-GaAs) 饱和吸收体是在半绝缘 GaAs 衬底上采用低温生长 GaAs 的方法制备的, 它既具有调 Q 用 SESAM 可以灵活调节参量的优点, 又不需要过于复杂的生长工艺. 同时, 它解决了调 Q 用 SESAM 容易损坏等问题. 实验中采用 LT-GaAs 作为调 Q 元件兼输出镜, 研究了 Nd : YVO₄ 激光器的被动调 Q 特性, 成功地实现了 Nd : YVO₄ 激光器的被动调 Q 运转.

1 LT-GaAs 吸收体的制备与调 Q 原理

借鉴 SESAM 的制作方法, 采用金属有机气相淀积方法进行材料生长, 制作了新型的低温生长 GaAs 被动调 Q 吸收体. 生长结构如图 1.

首先在厚度为 500 μ m 的半绝缘 GaAs 晶片 (衬底) 上生长 500 nm 的 GaAs 缓冲层, 接着在低温 (550 $^{\circ}$ C) 下生长厚度为 3 μ m 的 GaAs 吸收区. 低温生长会产生大量 As_{Ga} 反空位和 V_{Ga} 空位, 分别作为电子和空穴陷阱^[10], 这些缺陷同 GaAs 晶片中的 EL2 类似^[3]. 因此, 这种低温生长 GaAs 也能够用来作为被动调 Q 吸收体.

* 山东省科技厅科技攻关计划资助 (031080125)

** Tel: 13615311697 Email: z. zhao@sdu.cn. com. cn

收稿日期: 2005-04-18



图1 低温 GaAs 吸收体制作结构

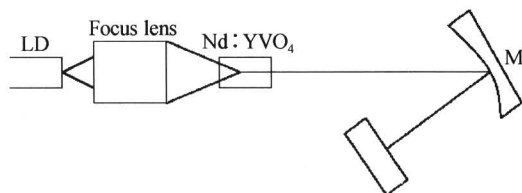
Fig.1 Schematic structure of LT-GaAs absorber

通过降低生长温度可以大大增加缺陷密度,从而降低恢复时间并提高调制深度. 另外,增加吸收区厚度也能够提高调制深度. 低温生长 GaAs 吸收体的另一个特点是吸收区很薄,只有几个 μm . 这样还可以通过对衬底进行减薄,使得吸收体的总厚度控制在 $100 \mu\text{m}$ 以内. 为了使吸收体能够同时兼作激光器的耦合输出镜,在 GaAs 晶片两面分别镀上增透膜和高反膜. 增透膜的反射率在 4% 以下,高反膜的反射率在 95% 左右.

2 实验与结果分析

2.1 实验装置

本实验所采用的装置如图 2. LD 为泵浦源,是美国相干公司生产的型号 FAP-System 的二极管激光器,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 $800 \mu\text{m}$,聚焦耦合系统的效率为 85%,聚焦后的束腰半径为 $320 \mu\text{m}$. Nd:YVO_4 晶体大小为 $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}$,沿 a -轴切割, Nd^{3+} 离子原子数分数为 1%,晶体一面镀 $0.808 \mu\text{m}$ 增透膜和 $1.064 \mu\text{m}$ 高反膜作为激光腔的一个端镜,另一面镀 $1.064 \mu\text{m}$ 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. 折叠镜 M 的曲率半径为 50 mm ,凹面镀 $1.064 \mu\text{m}$ 高反膜,整个激光腔的长度约为 125 mm . 实验中所用的 LT-GaAs 作为耦合输出镜,置于一可微调的平台上.

图2 低温 GaAs 吸收体被动调 Q 的 Nd:YVO₄ 激光器Fig.2 Experimental setup of passively Q-switched Nd:YVO₄ laser with LT-GaAs absorber

2.2 实验结果与讨论

图 3 是典型的调 Q 脉冲序列,重复频率约为 300 kHz . 可以看出,脉冲序列非常整齐. 当抽运功率达到 2 W 时,激光系统开始调 Q 运转. 随着抽运功率的增加,平均输出功率增加,脉冲宽度逐渐变窄,当抽运功率为 9.2 W 时,获得最短的脉冲,脉冲半峰全宽为 15 ns (如图 4),此时,也对应着最大单脉冲能量 $4.84 \mu\text{J}$,最高峰值功率 330 W 和最大平均输出功率 1.16 W . 当继续增大抽运功率时,由于热透镜效应等不定因素影响,导致调 Q 脉冲序列不稳定.

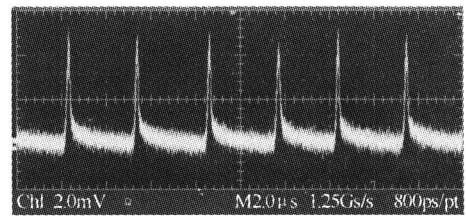


图3 脉冲序列波形

Fig.3 Pulse trains

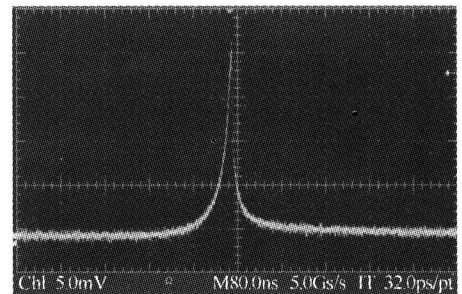


图4 单脉冲波形

Fig.4 Single pulse shape

图 5 和图 6 分别为平均输出功率和单脉冲能量随抽运功率的变化关系. 从图 5 可知,平均输出功率随抽运功率单调递增,斜率效率为 12.7%. 而在图 6 中,在抽运功率为调 Q 阈值时单脉冲输出能量为 $1.18 \mu\text{J}$;在抽运功率超过调 Q 阈值的小范围内,单脉冲输出能量随着抽运功率的增加而减小,在抽

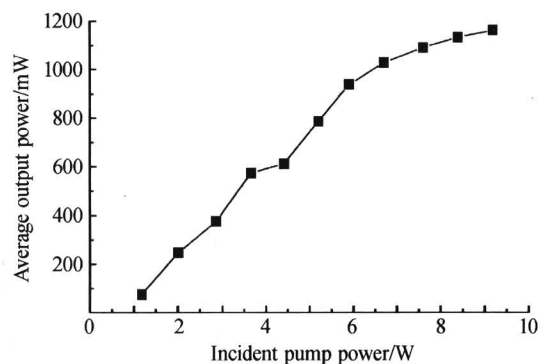


图5 平均输出功率与抽运功率关系

Fig.5 Relation of the average output power versus the incident pump power

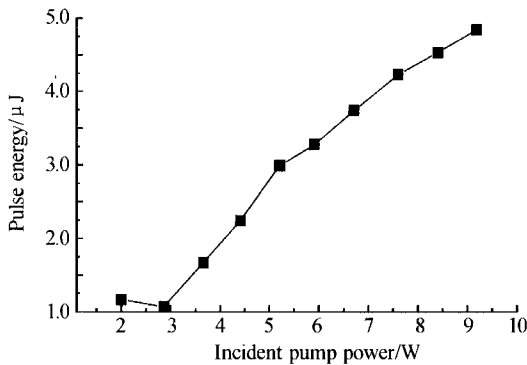


图 6 单脉冲能量与抽运功率关系

Fig. 6 Relation of the pulse energy versus the incident pump power

运功率 2.8 W 时达到最小为 1.07 μJ ; 之后开始增大, 在抽运功率 9.2 W 时达到最大为 4.84 μJ . 还注意到, 重复频率有着相反的变化规律. 随着抽运功率的增加, 重复频率从 220 kHz 开始快速增加. 当抽运功率 2.8 W 时, 重复频率达到最大为 360 kHz. 之后, 重复频率又开始下降. 在抽运功率 9.2 W 时, 重复频率降低到 240 kHz. 与通常的被动调 Q 有所不同, 本实验中重复频率随抽运功率先增大然后减小, 认为这与低温生长 GaAs 吸收体的双光子吸收有关^[11]. 再者, 可以通过重复频率的变化来解释单脉冲能量的变化规律.

初步实验未达到实现亚纳秒宽度调 Q 脉冲输出的预期目标. 本文认为这是由吸收体上激光聚焦面积太大、激光腔太长或者吸收体的调制深度太小等因素造成的. 对于第一点和第二点, 可以通过继续优化激光腔参量来加以解决. 对于第三点, 可以通过降低生长温度和增加吸收区生长厚度来加以解决.

3 结论

采用低温生长 GaAs 薄膜吸收体进行了 Nd:YVO₄ 激光器调 Q 研究, 初步得到了较好的实验结果. 获得的最短脉冲半峰全宽为 15 ns, 对应的平均输出功率为 1.16 W. 经过分析可知, 低温生长 GaAs 薄膜作为一种新型的可饱和吸收体, 与传统的调 Q 用半导体可饱和吸收镜、GaAs 晶片、Cr⁴⁺:YAG 等相比, 具有恢复时间和调制深度等参量容易调节的优点. 此外, 由于吸收区只有几个微米厚, 可以将激光腔长压缩到厘米量级, 有望通过进一步的深入研究取得较好的结果.

参考文献

- 李桂秋, 赵圣之, 杨克建, 等. LD 泵浦 Nd:GdVO₄ 晶体 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 激光特性研究. 光子学报, 2005, **34**(6):810~813
Li G Q, Zhao S Z, Yang K J, et al. Acta Photonica Sinica, 2005, **34**(6):810~813
- 郑权, 陈颖新, 赵岭, 等. 可饱和吸收体 Cr⁴⁺:YAG 做被动调 Q 元件时的选模作用. 光子学报, 2002, **31**(5):550~552
Zheng Q, Chen Y X, Zhao L, et al. Acta Photonica Sinica, 2002, **31**(5):550~552
- 杨克建, 赵圣之, 赵宏明, 等. LD 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体 GaAs 被动调 Q 激光理论和实验研究. 光子学报, 2005, **34**(2):169~172
Yang K J, Zhao S Z, Zhao H M, et al. Acta Photonica Sinica, 2005, **34**(2):169~172
- Keller U, Miller D A B, Boyd G D, et al. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers; an A-FPSA. Opt Lett, 1992, **17**(7):505~507
- Keller U, Weingarten K J, Kartner F X, et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers. IEEE J Select, Topics Quantum Electron, 1996, **2**(3):435~453
- Obe M H, Hofer M, Keller U, et al. Self-starting diode-pumped femtosecond Nd fiber laser. Opt Lett, 1993, **18**(18):1532~1534
- Braun B, Kartner F X, Moser M, et al. 56 ps passively Q-switched Nd:LSB microchip laser. Opt Lett, 1997, **22**(6):381~383
- Petropoulos P, Offerhaus H L, Richardson D J. Passive Q-switching of fiber lasers using a broadband liquefying gallium mirror. Appl Phys Lett, 1999, **74**(24):3619~3621
- Spühler G J, Paschotta R, Fluck R, et al. Experimentally confirmed design guidelines for passively Q-switched microchip lasers using semiconductor saturable absorbers. J Opt Soc Am B, 1999, **16**(3):376~388
- Wang Yonggang, Ma Xiaoyu, Li Chunyong, et al. A passively mode-locked diode-end-pumped Nd:YAG laser with a semiconductor saturable absorber mirror grown by metal organic chemical vapor deposition. Chin Phys Lett, 2003, **20**(11):1960~1962
- 李平, 王青圃, 张行愚, 等. 激光二极管抽运的 Nd:YVO₄/GaAs 被动调 Q 激光器研究. 光学学报, 2002, **22**(3):298~302
Li P, Wang Q P, Zhang X Y, et al. Acta Optica Sinica, 2002, **22**(3):298~302

Study on the Characteristics of Q-switching Nd : YVO₄ Laser with GaAs Grown at Low Temperature

Jiang Qichang¹, Zhuo Zhuang^{1,2}, Wang Yonggang^{3,4}, Li Jian¹, Su Yanli¹,
Ma Xiaoyu³, Zhang Zhigang⁴, Wang Qingyue⁴

1 College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014

2 Shanda Luneng Information & Technology Co. Ltd, Jinan 250100

3 Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083

*4 College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Institute of laser and Optoelectronics,
Ultra fast Laser Lab, Tianjin University, Tianjin 300072*

Received date: 2005-04-18

Abstract A diode-pumped passively Q-switched Nd : YVO₄ laser was demonstrated by using GaAs film growing at a low temperature. The threshold power at the Q-switching is 2 W. The shortest pulse duration is 15 ns. The highest single pulse energy is 4.84 μJ and the highest peak power is 330 W. The repetition rate varies between 220 kHz and 360 kHz and the highest average output power is 1.16 W.

Keywords GaAs grown at low temperature; Passive Q-switch; Nd : YVO₄ laser; Laser diode pumping

Jiang Qichang was born in Shandong Province, China, and in 1980. He is presently pursuing the M. S. degree in optics at College of Physics and Electronics, Shandong Normal University. He is interested in high performance solid-state laser.

