

文章编号:1004-4213(2010)02-0193-4

AlGaInAs 半导体饱和吸收体调 Q 特性的 理论与实验研究*

张真,张行愚[†],王青圃,刘兆军,丛振华,陈晓寒,范书振,张琛

(山东大学 信息科学与工程学院,济南 250100)

摘要:利用通过金属化学气相沉积法长成的 AlGaInAs 饱和吸收体,对 808 nm LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 键合晶体进行被动调 Q,获得了波长为 1.06 μm 的激光脉冲,测量了脉冲能量、脉冲宽度、脉冲重复率随泵浦功率的变化.当泵浦功率为 10.57 W 时,激光平均输出功率为 3.45 W,斜效率为 39%,重复频率达到最大值 101 kHz.当泵浦功率为 8.07 W 时,脉冲宽度达到最小值 1.76 ns.利用速率方程对该激光器进行理论分析,计算出输出脉冲能量、峰值功率、脉冲宽度和重复频率的理论值,实验结果和理论结果基本一致.

关键词:激光物理;AlGaInAs;饱和吸收体;调 Q;速率方程

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103902.0193

0 引言

采用固体饱和吸收体的被动调 Q 激光器以其结构紧凑和易于操作的特点,在工业、医疗、光谱学等领域有广泛的应用.20 世纪 90 年代以来,一系列新型固体饱和吸收体相继出现,比如掺 Cr 晶体^[1-5]和半导体饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirrors, SESAMs)^[6-7].相对于掺 Cr⁴⁺晶体,半导体饱和吸收体的优点是可以调整半导体材料的元素构成和比例,使之适用于更宽波长范围的被动调 Q 激光器^[6].

本文报道一种新型 AlGaInAs 半导体饱和吸收体的被动调 Q 特性.所采用的 AlGaInAs 半导体饱和吸收体是用金属化学气相沉积法生长的,由两部分组成:吸收体部分和基底部分.基底是掺 Fe 的 InP,吸收体部分由 30 对周期性的量子阱结构组成.

相对于半导体饱和吸收镜材料,AlGaInAs 半导体饱和吸收体没有布拉格反射镜结构(Distribute Bragg Reflector, DBR),因此结构简单,易于生长,从而可以实现大规模生产^[8].2007 年, Y. F. Chen 第一次采用具有周期性量子阱结构的 AlGaInAs 作为调 Q 饱和吸收体,以 LD 为泵浦光源, Nd:YVO₄ 为增益介质,得到了高功率和高平均功率的 1.06 μm 的激光脉冲.在泵浦功率为 13.5 W 时,脉

冲的平均功率为 3.5 W,斜效率为 31%,单脉冲能量为 33 μJ^[8].在此基础上,本文对 AlGaInAs 的调 Q 特性进行了进一步研究,利用键合 Nd:YVO₄ 晶体做为增益介质,详细测量了脉冲能量、脉冲宽度、脉冲重复率随泵浦功率的变化.当泵浦功率为 10.57 W 时,激光平均输出功率为 3.45 W,斜效率为 39%,重复频率达到最大值 101 kHz.当泵浦功率为 8.07 W 时,脉冲宽度达到最小值 1.76 ns.利用速率方程对该激光器进行理论分析,计算出输出脉冲能量、峰值功率、脉冲宽度和重复频率的理论值,实验结果和理论结果基本一致.

1 实验装置与结果

实验装置如图 1,谐振腔采用平-凹腔.泵浦源为光纤耦合输出的半导体激光器,中心波长是 808 nm,纤芯直径为 400 μm.增益介质是 a 切 Nd:YVO₄-YVO₄ 键合晶体,掺杂浓度为 0.2%,尺寸为 3×3×10 mm³(其中 8 mm 为 Nd:YVO₄ 晶体,2 mm 为 YVO₄ 基质).晶体的一面镀 808 nm 和 1064 nm 防反膜($R < 0.2\%$),另一面镀 1064 nm 防反膜($R < 0.2\%$).平凹镜 M₁ 作为激光腔的后腔镜,凹面曲率半径为 3000 mm,镀 808 nm 高透膜和 1064 nm 高反膜,平面不镀膜.平面镜 M₂ 对 1064 nm 光的透过率是 49%.AlGaInAs 两面镀有 1064 nm 防反膜.增益介质和半导体饱和吸收体都通过铜块热沉,用恒温循环器冷却控温在 20 °C.腔长是 25 mm.用 Moletron EPM2000 功率计测量激光输出平均功率 P_{av},用 Tektronix DPO7104 数字

* 国家自然科学基金(60778012)资助

[†] Tel:0531-88362358-8308

Email: xyz@sdu.edu.cn

收稿日期:2009-03-05

修回日期:2009-07-17

示波器(1 GHz bandwidth)观测脉冲宽度 W 和脉冲重复频率 f , 由公式 $E = P_{av}/f$ 和 $P_{peak} = E/W$ 计算单脉冲能量 E 和脉冲峰值功率 P_{peak} .

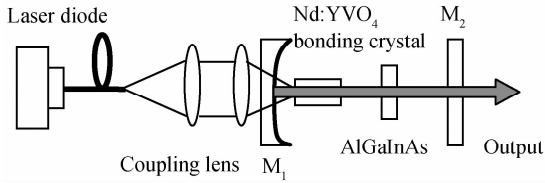


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

图2是输出功率与泵浦功率的关系, 阈值泵浦功率为 1.73 W, 当泵浦功率为 10.57 W 时, 激光输出功率为 3.45 W, 斜效率为 39%. 图3是脉冲重复频率和单脉冲能量随泵浦功率的变化关系. 重复频率随着泵浦功率的增加单调增加, 当泵浦功率达到 10.57 W 时, 重复频率达到最大值 101 kHz. 单脉冲能量初期随着泵浦功率的增加而增加, 在泵浦功率为 5.41 W 时达到最大值 44.1 μ J, 随后随泵浦功率的增加而减小. 图4是峰值功率和脉冲宽度随着泵浦功率的变化关系. 脉冲宽度随泵浦功率的增加单调缓慢下降, 当泵浦功率是 2.03 W 时, 脉冲宽度为 4.85 ns, 当泵浦功率是 8.07 W 时, 脉冲宽度为 1.76 ns. 峰值功率在泵浦功率是 8.07 W 时, 达到最

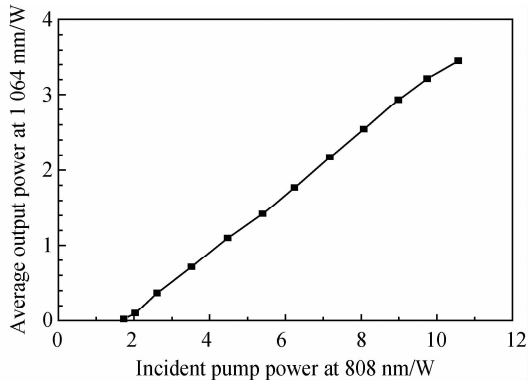


图2 平均输出功率随泵浦光功率的变化

Fig. 2 Average output power at 1064 nm as a function of the incident pump power

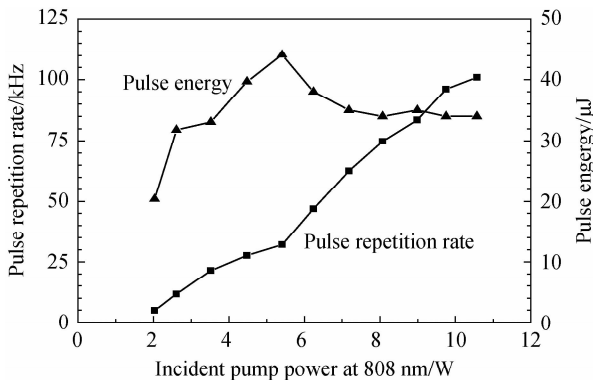


图3 脉冲重复频率和单脉冲能量随泵浦功率的变化

Fig. 3 Pulse repetition rate and pulse energy as functions of the incident pump power

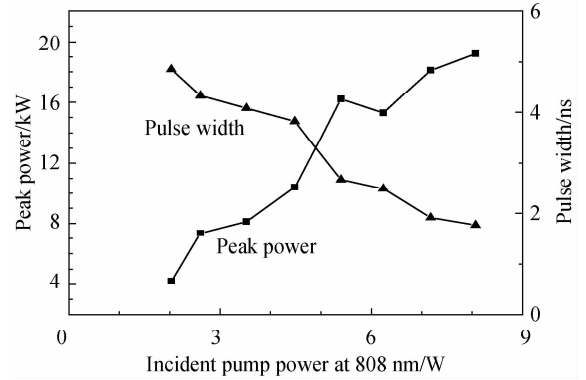


图4 峰值功率和脉冲宽度随泵浦功率的变化

Fig. 4 Peak power and pulse width as functions of the incident pump power

大值 19.2 kW. 图5是在泵浦功率为 6.24 W 时得到的一个典型的被动调 Q 脉冲波形.

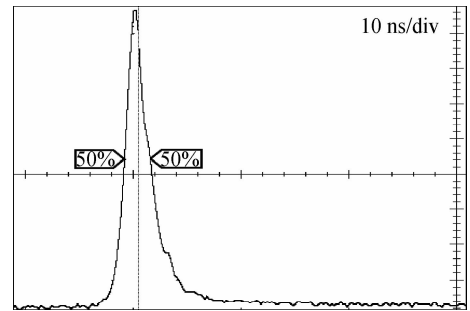


图5 调 Q 脉冲示波器波形

Fig. 5 Pulse profile on the oscilloscope

2 理论分析

由于 AlGaInAs 的一些参量还不清楚, 本文用平面波近似下的被动调 Q 激光器速率方程进行分析. 在激光腔内没有形成激光振荡时, AlGaInAs 半导体饱和吸收体的透过率为小信号透过率 T_0 , 反转粒子数密度在泵浦作用下不断增加. 当增益介质的反转粒子数密度 n 达到 n_i 时, 腔内开始有激光产生^[9].

$$n_i = \frac{\ln\left(\frac{1}{n}\right) + \ln\left(\frac{1}{T_0}\right) + L}{2\sigma l} \quad (1)$$

式中, R 是输出镜的反射率, T_0 为小信号透过率, σ 是增益介质的受激发射截面, L 是腔内杂散性损耗, l 是增益介质的长度.

假定腔内光强还远远小于腔内峰值光强时(此时反转粒子数的消耗还很少. 反转粒子数密度还可近似为 n_i), 饱和吸收体已经被漂白, 透过率达到最大值 T_s , 调 Q 的速率方程可以写成^[10-11]

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left[2\sigma n l - \ln \frac{1}{T_s} - \ln \frac{1}{R} - L \right] \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma\sigma\phi n \quad (3)$$

式中, ϕ 是腔内光子数密度, t_r 是光在腔内往返一周

的时间, γ 为反转因子. 令式(2)等于 0, 可以得到阈值反转粒子数 n_i

$$n_i = \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \ln\left(\frac{1}{T_s^2}\right) + L}{2\sigma l} \quad (4)$$

求解速率方程(2)、(3), 可以得到脉冲峰值功率 P_{peak} ^[12]

$$P_{\text{peak}} = \frac{Alh\nu}{\gamma t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \left\{ n_i - n_i \left[1 + \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \right] \right\} \quad (5)$$

式中, A 是增益介质中激光束的有效截面积. 对脉冲功率进行积分, 可以得到输出能量 E ^[12]

$$E = \int_0^\infty dt P(t) = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \quad (6)$$

式中, n_f 是脉冲结束时的反转粒子数密度

$$n_i - n_f - n_i \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) = 0 \quad (7)$$

通过式(7)可以求出 n_f 的数值解^[12]. 式(6)除以式(5)可以求出脉冲宽度 W

$$W = \frac{E}{P_{\text{peak}}} = t_c \frac{n_i - n_f}{n_i - n_i \left[1 + \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right) \right]} \quad (8)$$

式中, t_c 是光子弛豫时间

$$t_c = \frac{t_r}{\left[\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \ln\left(\frac{1}{T_s^2}\right) + L \right]} \quad (9)$$

激光脉冲的重复频率 f 可以表示为^[10-11]

$$f = \frac{1/B/B_{\text{th}} - (1+\beta)/2}{\tau_a (1-\beta)} \quad (10)$$

式中 τ_a 是增益介质上能级寿命, B 和 B_{th} 是正比于泵浦功率和阈值泵浦功率的参量, β 值由式(11)决定^[10-11]

$$\beta = 1 - \frac{f_a}{\gamma} \left(1 - \frac{n_f}{n_i} \right) \quad (11)$$

式中 f_a 是激光上能级的波尔兹曼因数, 即激光上能级粒子数密度占激光上能级组粒子数密度比例.

理论计算所用参量为: $R=0.51$, $L=0.1$, $l=2$ mm, $\sigma=2.5 \times 10^{-18}$ cm², $T_0=0.70$, $T_s=0.94$, $t_r=0.24$ ns, $\gamma=0.71$, $f_a=0.48$, $A=0.145$ mm². 通过计算得到: $E=44.9$ μ J, $P_{\text{peak}}=22.9$ kW, $W=1.99$ ns. 由此可以算出腔内峰值光强为 2.7×10^7 W/cm². 在计算中, 假设当腔内光强还远远小于腔内峰值光强时, 饱和吸收体已经被漂白, 透过率达到最大值 T_s . 根据文献[8], 可算出 AlGaInAs 饱和吸收体的饱和光强 I_s 的数量级约为 10^4 W/cm². 因此当腔内光强 I 远大于 I_s , 例如 $I=1 \times 10^6$ W/cm² 时, 饱和吸收体被漂白, 此时腔内光强远小于腔内峰值光强, 可以认为腔内的反转粒子数被消耗的很少, 可近似为 n_i , 假设成立. 表 1 是单

脉冲能量、峰值功率和脉冲宽度的理论结果和实验结果的比较. 图 6 是脉冲重复频率的理论结果和实验结果的比较. 单脉冲能量、峰值功率和脉冲宽度的理论结果只有一个值, 而实验数据却是一个范围. 单脉冲能量和峰值功率的理论值与实验数据的较大值符合. 脉冲宽度的理论值与实验数据的较小值符合. 重复频率的实验结果和理论结果随泵浦功率的变化趋势一致, 但实验值略小于理论值. 造成理论结果和实验结果存在一定差距的原因有: 1) 未考虑脉冲形成过程中泵浦对反转粒子数密度的影响; 2) 理论计算中使用的一些参量的取值未必符合实际情况; 3) 热透镜效应对谐振腔的影响仅考虑了平均效果.

表 1 单脉冲能量、峰值功率、脉冲宽度实验结果和理论结果的比较

Table 1 Comparison of the theoretical results and experimental results of the pulse energy, peak power and pulse width

	Theoretical results	Experimental results
$E/\mu\text{J}$	44.9	20.4~44.1
$P_{\text{peak}}/\text{kW}$	22.9	4.2~19.2
W/ns	1.99	1.76~4.85

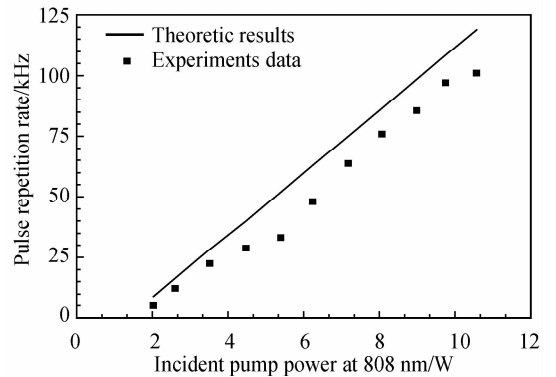


图 6 脉冲重复率随泵浦功率变化

Fig. 6 Pulse repetition rate as a function of the incident pump power

3 结论

研究了 AlGaInAs 半导体饱和吸收体的调 Q 特性, 测量了单脉冲能量, 脉冲峰值功率, 脉冲宽度和重复频率随泵浦功率变化的关系. 用平面波近似下的被动调 Q 激光器速率方程进行了理论分析, 理论结果与实验结果大致相符.

致谢: 感谢台湾陈永富教授提供 AlGaInAs 样品.

参考文献

- [1] FORGET S, DRUON F, BALEMBOIS F, *et al.* Passively Q-switched diode-pumped Cr⁴⁺:YAG/Nd³⁺:GdVO₄ monolithic microchip laser [J]. *Opt Commun*, 2006, **259**(2): 816-819.
- [2] ZOLOTOVSKAYA S A, YUMASHEV K V, KULESHOV N

- V, *et al.* Absorption saturation properties and laser Q-switch performance of Cr⁵⁺-doped YVO₄ crystal [J]. *Appl Phys B*, 2007, **86**(4): 667-671.
- [3] YU Hao-hai, ZHANG Huai-jin, WANG Zheng-pin, *et al.* Growth and passively self-Q-switched laser output of new Nd³⁺, Cr⁵⁺; GdVO₄ crystal [J]. *Opt Express*, 2008, **16**(5): 3320-3325.
- [4] OKHRIMCHUK A G, MEZENTSEV V K, DVOYRIN V V, *et al.* Waveguide-saturable absorber fabricated by femtosecond pulses in YAG:Cr⁴⁺ crystal for Q-switched operation of Yb-fiber laser [J]. *Opt Lett*, 2009, **34**(24): 3881-3883.
- [5] LIU Shao-long, ZHU Shao-lan, ZHAO Wei, *et al.* Investigation on repetition rate stability of Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched microchip laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1717-1721.
刘少龙, 朱少岚, 赵卫, 等. Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 微晶片激光器重复频率稳定性研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(9): 1717-1721.
- [6] SPÜHLER G J, WEINGARTEN K J, GRANGE R, *et al.* Semiconductor saturable absorber mirror structures with low saturation fluence [J]. *Appl Phys B*, 2006, **81**(1): 27-32.
- [7] MAAS D J, RUDIN B, BELLANCOURT A R, *et al.* High precision optical characterization of semiconductor saturable absorber mirrors [J]. *Opt Express*, 2008, **16**(10): 7571-7579.
- [8] HUANG S C, LIU S C, LI A, *et al.* AlGaInAs quantum-well as a saturable absorber in a diode-pumped passively Q-switched solid-state laser[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(11): 1840-1842.
- [9] WANG Qing-pu, ZHANG Xing-yu, LIU Ze-jing, *et al.* Principles of laser[M]. Jinan: Shandong University Press, 2003; 263-264.
王青圃, 张行愚, 刘泽金, 等. 激光原理[M]. 济南: 山东大学出版社, 2003; 263-264.
- [10] DEGNAN J J. Optimization of passively Q-switched Lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, **31**(11): 1890-1901.
- [11] ZHANG Xing-yu, ZHAO Sheng-zhi, WANG Qing-pu, *et al.* Optimization of Cr⁴⁺-doped Saturable-absorber Q-switched lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(12): 2286-2294.
- [12] DEGNAN J J. Theory of optimally coupled Q-switched laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, **25**(2): 214-220.

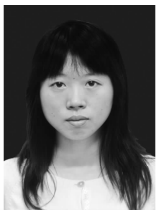
Theoretical and Experimental Study on the Q-switching Characteristics of AlGaInAs Saturable Absorber

ZHANG Zhen, ZHANG Xing-yu, WANG Qing-pu, LIU Zhao-jun,
CONG Zhen-hua, CHEN Xiao-han, FAN Shu-zhen, ZHANG Chen

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: The AlGaInAs semiconductor saturable absorber grown by Metal-organic Chemical Vapor Deposition is used as the saturable absorber in a 808 nm LD-pumped passively Q-switched Nd : YVO₄ laser at 1.06 μm. The dependences of the pulse energy, pulse width, pulse repetition rate on the pumping power are measured. With an incident pump power of 10.57 W, an average output power of 3.4 W is obtained, and the corresponding slope efficiency is 39%. At this pump power, the repetition rate reaches the maximum value of 101 kHz. The Q-switched pulse width reaches the minimum of 1.76 ns with an incident pump power of 8.07 W. Using the rate equations of passively Q-switched lasers, the theoretical results for the pulse energy, pulse width, pulse repetition rate are obtained, which show an agreement with the experimental results on the whole.

Key words: Laser physics; AlGaInAs; Semiconductor saturable absorber; Q-switching; Rate equations



ZHANG Zhen was born in 1983. She obtained her MS. S. degree from School of Information Science and Engineering, Shandong University in 2009. Her major research interests focus on laser physics, especially solid-state lasers.



ZHANG Xing-yu was born in 1963. He obtained Ph. D. degree in optical engineering from Shandong University. He is now a professor of School of Information Science and Engineering of Shandong University, and his research interests focus on laser technologies and applications.