

文章编号: 0253-2239(2003)03-0326-04

激光二极管抽运的 GaAs 被动 Q 开关 Nd:YVO₄ 激光器

柳 强 巩马理 闫 平 郭云霄 谢 涛 王东生

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要: 利用固体可饱和吸收体砷化镓(GaAs)作为被动调 Q 元件, 实现了激光二极管抽运平-凹腔掺钕钒酸钇(Nd:YVO₄)激光调 Q 运转, 详细测量了砷化镓被动调 Q Nd:YVO₄ 激光输出特性, 获得脉宽 15 ns, 重复频率 470 kHz, 光束质量 $M^2 = 1.31$ 的激光输出, 调 Q 激光运转阈值为 500 mW, 并数值求解了砷化镓被动调 Q 速率方程, 讨论了被动调 Q 机理以及调 Q 脉冲宽度和脉冲重复频率对抽运速率的依赖关系, 理论计算结果与实验结果相一致。

关键词: 激光器; 被动调 Q; 可饱和吸收体; 砷化镓

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

1 引 言

近年来, 全固态被动调 Q 微片激光器由于具有许多优点(体积小、重量轻、转换效率高、寿命长等)和越来越广泛的应用前景引起了人们极大的兴趣, 成为固体激光发展的一个重要的方向。被动 Q 开关材料也由热性能、机械性能较差, 只用低重复频率的染料逐渐发展成为热性能好、可高重复频率工作的固体可饱和吸收体, 特别是 Cr³⁺:YAG 晶体的被动调 Q 特性, 国内外已经进行了全面、详细的研究。

半导体砷化镓最早应用于激光器件上是作为锁模元件^[1], 1996 年才发现其具有被动调 Q 特性^[2], 相继实现了氙灯抽运 Nd:YAG 和激光二极管抽运 Nd:YAG、Nd:YVO₄ 被动调 Q 运转^[3~5]。在激光二极管抽运砷化镓被动调 Q 的固体激光装置中, 一般采用砷化镓既作为调 Q 元件, 又作为输出耦合镜^[4], 或者是利用透镜和砷化镓组合起来作为输出耦合器^[5]。本文在激光二极管抽运平-凹激光谐振腔内, 选用具有较大的发射截面、吸收带宽和输出线偏振的掺钕钒酸钇(Nd:YVO₄)为激光增益介质, 采用光纤耦合使抽运光与 TEM₀₀ 激光模体积容易相匹配的端面抽运方式, 实现了全固态被动调 Q 微片激光运转。对激光器输出的脉冲特性、功率特性以及激光光束质量进行了详细的测量和分析, 抽运功率从 580 mW 增加到 2700 mW 过程中, 脉冲宽度在 109~15 ns 之间变化, 重复频率在 192~450 kHz 之间变化, 证明了半导体砷化镓是一种有效的激光

被动调 Q 材料。

2 砷化镓被动调 Q 机理及实验装置

Nd:YVO₄ 激光器的输出波长为 1064 nm, 对应的光子能量为 1.17 eV, 而半导体砷化镓的能带间隔为 1.42 eV, 依照传统固体饱和吸收体的被动调 Q 理论, 砷化镓是不能作为被动调 Q 元件的。但是, 非掺杂砷化镓晶体在生长过程中, 由于碳的化学污染在导带与价带间产生了深能级 EL2 和 EL2⁺^[6], 在 1064 nm 激光辐照下, EL2⁺ 能级上粒子吸收光子, 并从价带俘获电子跃迁到 EL2 能级, 在价带上形成一个带正电的空穴。同时, EL2 能级上粒子也将吸收光子, 并发射电子到导带, 从而跃迁到 EL2⁺ 能级, 这一过程类似于双光子吸收过程, 由于 EL2 的吸收截面大, 砷化镓吸收跃迁的结果导致 EL2 能级上的粒子全部跃迁到 EL2⁺ 能级上, 吸收趋于饱和。

连续抽运砷化镓被动调 Q 四能级激光器运转的动力学过程可以由以下速率方程式表示^[3,4]:

$$d\phi/dt = \{2\sigma Nl - 2[\sigma_e(n_0 - n^+) + \sigma_n n^+]\}d - \ln(1/R) - \delta\}(\phi/\tau), \quad (1)$$

$$dN/dt = p(1 - N/N_{tot}) - \gamma\sigma\phi N, \quad (2)$$

$$dn^+/dt = [2\sigma_e(n_0 - n^+) - 2\sigma_n n^+]\phi/\tau. \quad (3)$$

其中 ϕ 为腔内光子数密度, $\tau = 2L/c$ 为光子在腔内往返一周的时间, P 为抽运速率, L 为激光腔的长度, c 为光速, σ 、 N 、 l 分别为激光介质的受激发射截面、反转粒子数密度和长度, σ_e 、 σ_n 为砷化镓两个能级 EL2 和 EL2⁺ 的吸收截面, γ 为反转因子, n_0 、 n^+ 为砷化镓两个能级 EL2 和 EL2⁺ 的粒子数密度, N_{tot} 为增益介质的粒子浓度, δ 为激光器的损耗, d 为砷化镓

E-mail: liuqiang@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2002-01-28; 收到修改稿日期: 2002-04-22

的厚度。它主要描述了腔内光子数密度、激光介质上能级反转粒子数密度以及砷化镓作为两能级系统的吸收特性。结合后面的具体实验,利用变步长龙格-库塔法数值求解,计算了过程中的相关参量,如表 1。

Table 1 Related parameters in Eqs. (1)~(3)

σ / cm^2	2.5×10^{-18}	l / mm	1
σ_e / cm^2	1.0×10^{-16}	d / mm	0.36
σ_h / cm^2	2.3×10^{-17}	γ	1
n_0 / cm^{-3}	1.2×10^{16}	R	0.96
n^+ / cm^{-3}	1.4×10^{15}	L / mm	50
N / cm^{-3}	2.74×10^{17}	δ	0.5
$N_{\text{tot}} / \text{cm}^{-3}$	2.75×10^{20}		

这样,就能够得到激光介质上能级反转粒子数变化、调 Q 脉冲的形成过程以及砷化镓两个能级间粒子数的转移过程(见图 1)。在调 Q 脉冲形成前,激光工作介质上能级粒子数聚集增多,腔内的光子数目也逐渐增大,此时,由于砷化镓双光子吸收作用导致腔内损耗减少,激光工作介质上能级粒子数急剧跃迁到下能级,调 Q 脉冲开始产生,此时饱和吸收体 EL2 能级上粒子也快速向 EL2⁺ 能级转移,进一步加速调 Q 脉冲的产生。调 Q 脉冲形成后,EL2 能级上粒子几乎全部转移 EL2⁺ 能级上,激光介质上能级反转粒子数也降到最小值。

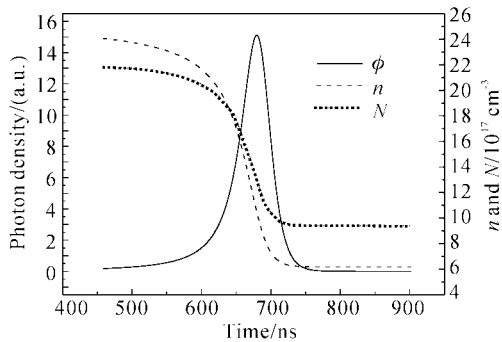


Fig. 1 Numerical simulations of the temporal shape of a single Q-switched pulse

另外,通过对方程的求解,我们获得抽运速率对输出激光的脉冲宽度、重复频率、平均输出功率和脉冲峰值功率的影响如图 2 所示。随着抽运速率的增加,调 Q 激光的脉冲宽度变窄,重复频率增加,平均功率和脉冲峰值功率增大。

激光二极管光纤耦合端面抽运 Nd:YVO₄-GaAs 被动调 Q 激光器如图 3 所示。抽运源为带尾纤输出的温控半导体激光器,光纤芯径为 400 μm ,数值孔径 NA 为 0.22,光学系统传输比为 1:1。Nd:YVO₄ 晶体抽运面镀 1064 nm 高反膜,808 nm 高透膜,晶体的掺杂原子数分数为 2%,尺寸为

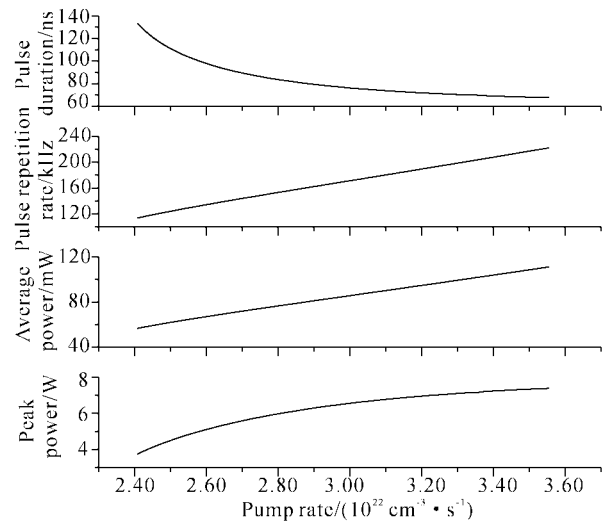


Fig. 2 Pulse duration, pulse repetition rate, average power and peak power as a function of the pump rate

3 mm \times 3 mm \times 1 mm。砷化镓晶体的厚度为 360 μm ,切割方向为 $\langle 100 \rangle \pm 0.6^\circ$,晶体的两面精密抛光。输出耦合镜的曲率半径为 100 mm、透过率为 4%。Nd:YVO₄ 晶体采用了导热性很好的紫铜作为晶体的热沉,激光器腔长为 50 mm。实验中精确调整激光二极管的温度,使得其工作波长为 808.7 nm,与 Nd:YVO₄ 晶体的吸收峰相匹配,同时调整激光二极管输出的偏振态,保证 Nd:YVO₄ 晶体的偏振吸收方向占有最大的分量。利用 Molelectron Detector 公司 EPM2000 型功率计,美国 Spiricon 公司 PC 激光光束分析仪和 M²-200 光束传输分析仪以及 New Focus 公司快速响应探头配合示波器分别对激光输出功率,激光强度分布,激光光束质量以及输出激光的脉冲特性进行了详细测量。

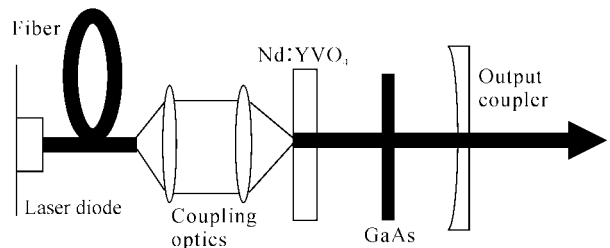


Fig. 3 Schematic diagram of a passively Q-switched Nd:YVO₄ laser with GaAs

3 实验结果与讨论

图 4、图 5 分别为调 Q 脉冲宽度、脉冲重复频率和平均输出功率随抽运功率的变化关系。调 Q 激光运转阈值为 580 mW,随着抽运功率的增加,脉冲

宽度变窄,重复频率升高,平均输出功率增加。从图中可以看出,调Q激光运转的阈值较高,当抽运功率从580 mW增加到2700 mW过程中,脉冲宽度从109 ns减小到15 ns,重复频率从192 kHz增加到450 kHz,与理论计算结果的变化趋势是一致的。通过计算可得到调Q单脉冲能量值,发现在抽运功率的增加的过程中单脉冲能量并不保持不变,说明了Q开关不充分,输出激光中含有直流本底。调Q激光运转的阈值较高的主要原因是砷化镓晶体的表面没有镀1064 nm的增透膜,激光腔内晶体的插入损耗很大造成的。导致Q开关不充分的原因是由于实验中采用的砷化镓晶体较薄,实际测量,除去砷化镓晶体的表面反射损耗,砷化镓晶体的初始透过率高达98.5%,调Q脉冲产生前后,腔内由于砷化镓的饱和吸收引起的损耗的阶跃量小,同时Nd:YVO₄晶体的受激发射截面较大,腔内最大的损耗小于激光增益,导致存在直流成份。

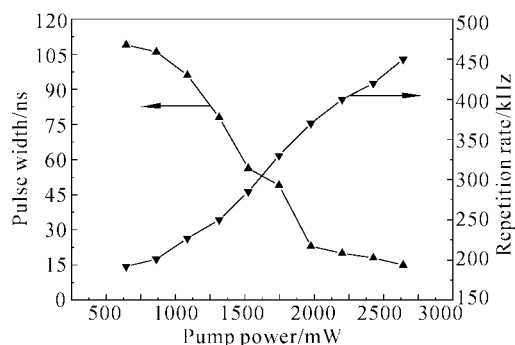


Fig. 4 Pulse duration and pulse repetition rate as a function of the pump power

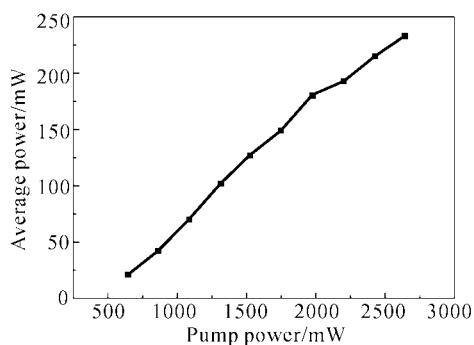


Fig. 5 Average power as a function of the pump power

图6、图7分别为38 ns 496个调Q脉冲叠加的结果和调Q脉冲序列取样。脉冲峰值的稳定性和脉冲宽度的稳定性较好。但在激光器长时间运转过程中,砷化镓被动调Q同其它可饱和吸收体一样,由于反应速度慢、初始粒子反转数不一致,同时调Q脉冲之间的也互相干扰,外界随机变化等因素对激

光器输出的影响等,使砷化镓被动调Q同样具有脉冲频率和脉冲峰值稳定性不好的缺点。

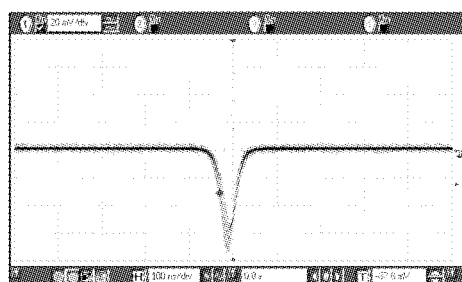


Fig. 6 496 Q-switched pulse waveforms

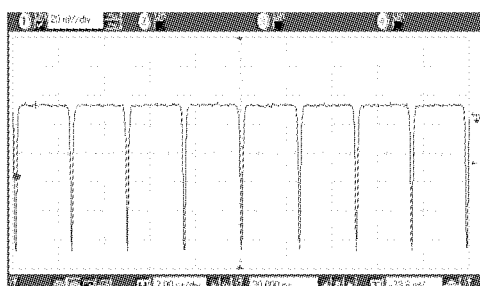


Fig. 7 A pulse train of GaAs Q-switching

图8(a)和图8(b)分别给出了激光光束的二维和三维的光强分布图,可以看出激光光束的对称性和均匀性较好,证明了激光器工作在TEM₀₀基横模状态。图9给出了M²-200光束传输测试仪所测激光光束经焦距f=500 mm的透镜后,其光束宽度和

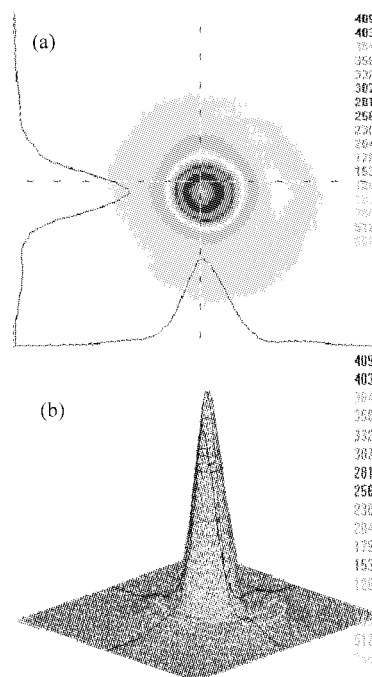


Fig. 8 Laser intensity distribution of the TEM₀₀ mode output. (a) 2-Dimensional; (b) 3-Dimensional

传输距离之间的曲线图, 其中的 xy 代表垂直于光轴平面上的坐标, 而 z 轴为以透镜后表面为原点光轴方向。所测光束质量因子 M^2 在 x 方向和 y 方向的值: $M_x^2 = 1.28, M_y^2 = 1.34$; 输出激光的 x 方向的束腰为 $307 \mu\text{m}$, y 方向的束腰为 $316 \mu\text{m}$; x 方向的发散角为 5.663 mrad , y 方向的发散角为 5.741 mrad 。

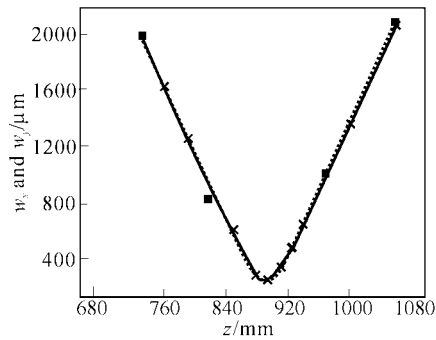


Fig. 9 Beam quality of the TEM₀₀ mode output on M^2

结论 半导体砷化镓晶体具有生长技术成熟、价格便宜、损伤阈值高、物化性能稳定以及易批量生产的优点。通过对非掺杂半导体砷化镓被动调 Q 激光器运转特性研究, 成功地实现了激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 微片 1064 nm 调 Q 激光运转, 获得了最

短脉宽 15 ns, 重复频率 470 kHz, 光束质量因子 $M^2 = 1.31$ 的 TEM₀₀ 激光基横模输出。进一步的工作是对砷化镓的厚度、激光谐振腔、激光增益介质参量进行优化, 以实现激光二极管端面抽运砷化镓被动调 Q Nd:YVO₄ 微片能更好、更稳定的运转。

参 考 文 献

- 1 Zhang Zhuhong, Qian Licjia, Fan Dianyuan *et al.*. Gallium arsenide: A new material to accomplish passively mode-locked Nd:YAG laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(4):419~421
- 2 Kajara T T, Gaeta A L. Q-switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with GaAs. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(16):1244~1246
- 3 Li Ping, Wang Qingpu, Gao Da *et al.*. Study of passively Q-switched Nd:YAG laser with GaAs. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(6):744~749 (in Chinese)
- 4 Gu Jiaohui, Zhou Feng, Kah Tau Wan *et al.*. Q-switching of a diode-pumped Nd:YVO₄ laser with GaAs nonlinear output coupler. *Opt. Lasers Engng.*, 2001, **35**:299~307
- 5 Gu Jiaohui, Zhou Feng, Xie Wenjie *et al.*. Passive Q-switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with a GaAs output coupler. *Opt. Commun.*, 1999, **165**(7):245~249
- 6 Valley G C, Smirl A L. Theory of transient energy transfer in gallium arsenide. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(2):304~310

Passive Q-Switching of Laser Diode-Pumped Nd:YVO₄ Laser with GaAs

Liu Qiang Gong Mali Yan Ping Guo Yunxiao Xie Tao Wang Dongsheng
(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 28 January 2002; revised 22 April 2002)

Abstract: Passive Q-switching of LD-pumped Nd:YVO₄ laser was demonstrated with a GaAs wafer as saturable absorbers in a plane-concave cavity. The pulse characteristics of passive Q-switched Nd:YVO₄ laser with a GaAs were measured. Q-switched pulse duration is 15 ns, pulse repetition rate is 470 kHz, beam quality M^2 is equal to 1.31 and laser threshold of passive Q-switching is 500 mW. The numerical calculations of rate equations for case of GaAs playing the role as mentioned above are performed, and passive Q-switched mechanism and the dependency of pulse duration and pulse repetition rate on pumping rate are discussed. The calculated result was well in agreement with the experiments results.

Key words: lasers; passively Q-switched; saturable absorbers; GaAs