

文章编号: 0258-7025(2005)01-0035-04

# 内腔倍频被动调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 激光特性的研究

赵宏明, 赵圣之, 陈磊, 杨克建\*

(山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

**摘要** 实现了激光二极管(LD)抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP, GaAs 饱和吸收体被动调 Q 绿激光运转。测量了 GaAs 不同厚度情况下的脉冲重复率、脉冲宽度、单脉冲能量及峰值功率随抽运功率的变化关系。在抽运功率 3.22 W 下, 300 μm 厚的 GaAs 获得了 381 kHz 的高重复率, 53.2 ns 的脉冲宽度, 0.18 μJ 的单脉冲能量。通过求解内腔倍频 GaAs 调 Q 工作原理的耦合波方程组, 所得的理论值与实验结果相符。

**关键词** 激光技术; GaAs; 被动调 Q; Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP; 倍频

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Study of Intra-Cavity Frequency-Doubling of a Nd:YVO<sub>4</sub> Laser Passively Q-Switched with GaAs

ZHAO Hong-ming, ZHAO Sheng-zhi, CHEN Lei, YANG Ke-jian

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250100, China)

**Abstract** By using GaAs saturable absorber, the running of a diode-pumped Q-switched intra-cavity frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP laser is realized. The dependences of pulse width, pulse repetition rate, pulse energy and peak power on pump power are measured with different thickness of GaAs. At 3.22 W of pump power, the laser Q-switched by 300 μm GaAs produces 53.2 ns pulses at a pulse repetition rate of 381 kHz. The pulse energy is 0.18 μJ. The rate equations of intra-cavity frequency-doubling laser Q-switched by GaAs are introduced to analyze the experimental results. The numerical calculations of the rate equations are consistent with the experimental results.

**Key words** laser technique; GaAs; passive Q-switched; Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP; frequency-doubling

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运的全固化激光器,以体积小、效率高等特点,受到了人们的广泛关注<sup>[1,2]</sup>。特别是经倍频获得绿光相干光源,在激光通信、遥感探测、军事、医学等领域有着广泛的应用前景。激光二极管抽运、被动调 Q 和内腔倍频是获得高重复率、高峰值功率绿激光的有效途径,饱和吸收体调 Q 晶体常采用染料片, Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体, 半导体材料等。半导体材料的能带间隙和能级寿命可以利用先进的

金属有机化学气相沉淀以及分子束外延生长技术,通过控制生长条件和生长环境加以调节,使其吸收光谱覆盖从可见光到远红外整个区域。

自 1996 年 T. T. Kajava 等发现半导体材料 GaAs 具有被动调 Q 的特性以来<sup>[3]</sup>,人们先后研究了氙灯抽运 Nd:YAG<sup>[4]</sup>, LD 抽运的 Nd:YAG<sup>[5,6]</sup>和 Nd:YVO<sub>4</sub> 等晶体的被动调 Q 特性<sup>[7,8]</sup>,但 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP, GaAs 内腔倍频的绿激光特性尚少见报道。本文从理论和实验两方面对激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 GaAs 被动调 Q 激光特性进行了研

收稿日期:2004-01-28; 收到修改稿日期:2004-04-07

基金项目:山东省科技发展计划(013060102)和教育部博士点基金资助项目。

作者简介:赵宏明(1979—),男,山东大学信息科学与工程学院硕士研究生,主要从事激光及非线性光学的研究。E-mail: mingwellcome@eyou.com

\* 通信联系人。E-mail:k. j. yang@sdu. edu. cn

究。测量了不同厚度 GaAs 情况下输出激光脉冲宽度、单脉冲能量及脉冲重复率随抽运功率的变化关系。求解内腔倍频 GaAs 调 Q 工作原理的耦合波方程组,所得的理论值与实验结果相符。

## 2 实 验

### 2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,采用了三镜折叠腔,抽运激光器是带光纤耦合的半导体激光器(FAP-I system Coherent Inc. USA)。腔镜  $M_1$  的曲率半径为 100 mm,镀 808 nm 的高透膜,1064 nm,532 nm 的高反膜。激光工作物质是 4 mm×4 mm×5 mm 掺杂浓度为 1.0% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,晶体一端镀 808 nm 增透膜,另一端镀 1064 nm 高透膜,实验中将其旋转 45°。折叠镜  $M_3$  兼作绿光输出镜,曲率半径为 100 mm。饱和吸收体 GaAs 片厚度为 300  $\mu\text{m}$  和 580  $\mu\text{m}$ ,表面镀 1064 nm 增透膜。KTP 晶体按 II 型相位匹配角切割(山东大学晶体所生长),尺寸为 3 mm×3 mm×7 mm,通光面均镀 1064 nm,532 nm 增透膜,其二次相位参数如表 1 所示(数据由山东大学晶体所提供)。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和 KTP 晶体冷却系统均采用水循环和温控半导体致冷片。 $M_2$  为平面全反镜,表面镀 1064 nm,532 nm 高反膜。实验中用 LPE-1B 型功率计和 TED620B 示波器分别测量绿光功率和脉冲特性。

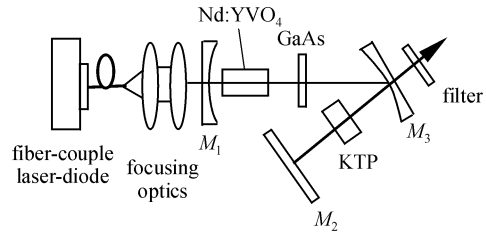


图 1 实验装置图

Fig. 1 The schematic of experimental setup

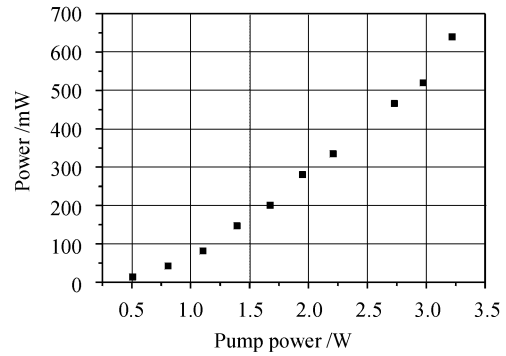


图 2 自由运转时输出绿光功率与抽运功率的关系

Fig. 2 Dependence of the cw green output power on pump power

表 1 KTP 晶体的二次相位匹配参数

Table 1 Parameters of II-type phase-matching KTP crystal

$n_o^{\omega}$	$n_e^{\omega}$	$n_e^{2\omega}$	$d_{\text{eff}}$	$\epsilon_0$
1.83	1.746	1.79	7.2 pm/V	$8.855 \times 10^{-12}$

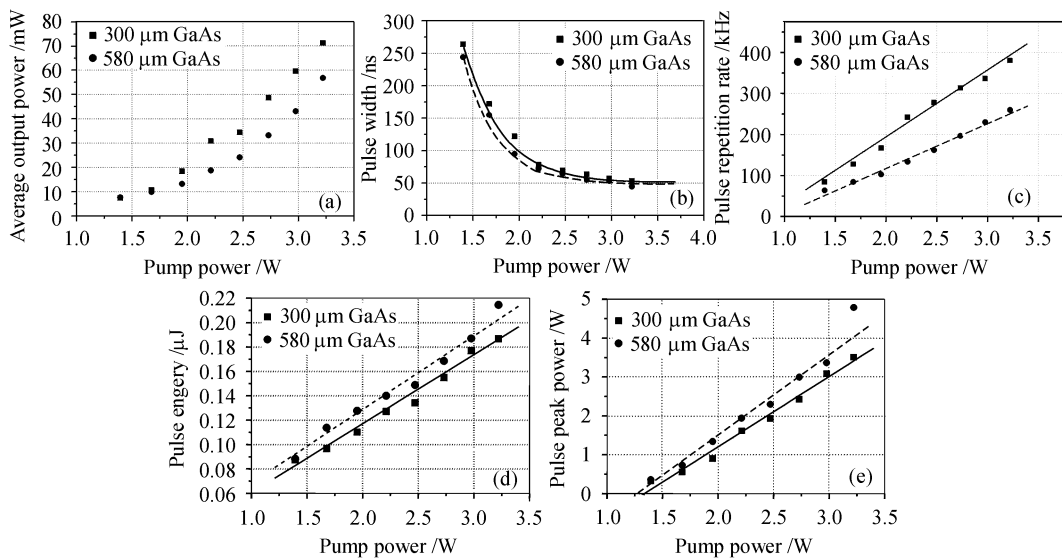


图 3 在不同厚度的 GaAs 片调 Q 下平均输出功率(a),脉冲宽度(b),脉冲重复率(c),单脉冲能量(d)及脉冲峰值功率(e)与抽运功率的关系

Fig. 3 Average output power (a), pulse width (b), pulse repetition rate (c), pulse energy (d) and pulse peak power (e) versus pumping power for different thickness GaAs

## 2.2 实验结果

在自由运转时,测量了绿光激光的输出功率随着抽运功率的变化,如图 2 所示,当抽运功率增大,输出绿光功率不断增加,在最大抽运功率 3.22 W 下,获得 640 mW 的连续绿光,光-光转换效率达到 19.9%。分别选用 300  $\mu\text{m}$ , 580  $\mu\text{m}$  不同厚度的饱和吸收体 GaAs 片放入腔内,在不同抽运功率下测量了其平均输出功率、脉冲宽度、重复率、单脉冲能量和峰值功率的变化,如图 3(a)~(e)所示。图示表明随着抽运功率的升高,输出的绿光平均功率增加,脉冲宽度明显减少,重复率不断升高,单脉冲能量和峰值功率也随之增加。在 300  $\mu\text{m}$  厚的 GaAs 吸收体被动调 Q 下,随着抽运功率从 1.4 W 到 3.22 W,输出脉宽从 266 ns 降到 53.2 ns,重复率从 88.9 kHz 增加到 381 kHz,3.22 W 下获得的 53.2 ns 的脉冲波形如图 4 实线所示。图 5 为实验中观察到的脉冲串,脉冲幅度起伏小于 4%。

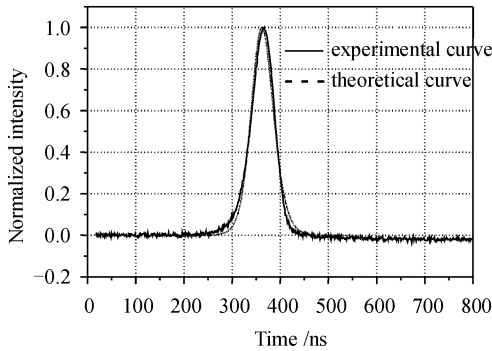


图 4 实验得到的 300  $\mu\text{m}$  厚 GaAs 调 Q 的脉冲波形与理论波形比较

Fig. 4 Comparison of the experimentally observed pulse profile of the 300  $\mu\text{m}$  GaAs to theoretical predictions

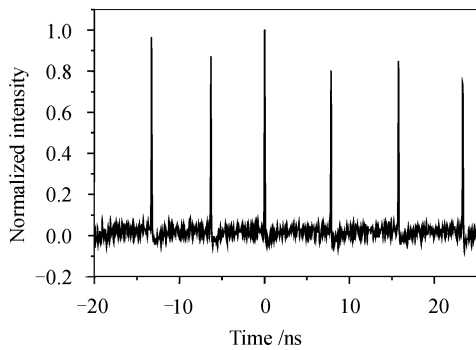


图 5 抽运功率 2 W 时,厚度为 300  $\mu\text{m}$  GaAs 所获得的脉冲串

Fig. 5 A pulse train of 300  $\mu\text{m}$  GaAs Q-switching at 2 W of pump power

## 3 理论分析及讨论

考虑到 GaAs 的单光子吸收 (SPA), 双光子吸收 (TPA) 及自由载流子吸收 (FCA), 根据速率方程和倍频理论, 可以得到 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 的 GaAs 被动调 Q 速率方程<sup>[9,10]</sup>

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} [2\sigma n l - 2\sigma^+ n^+ d - 2\sigma^0 (n_0 + n^+) d - 2\sigma_f N d - B\phi - \delta_N - L], \quad (1)$$

$$\text{其中 } \delta_N = \frac{P_{2\omega} t_r}{\hbar \omega \phi A L_c} = \frac{\omega^2 \cdot d_{\text{eff}}^2}{2c^3 \epsilon_0 n_e^{\omega} n_o^{\omega} n_e^{\omega}} \hbar \omega c l_k^2 \phi, \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = R_{\text{in}} - \frac{4\sigma n \phi}{h\nu} - \frac{n}{\tau}, \quad (3)$$

$$\frac{dn^+}{dt} = \frac{4[(n_0 - n^+) \sigma^0 - \sigma^+ n^+] \phi}{h\nu} - \gamma_{\text{et}} n^+ N + \gamma_{\text{hd}} (n_0 - n^+) p, \quad (4)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{4[(n_0 - n^+) \sigma^0 + (B\phi/2)] \phi}{h\nu} - \gamma_{\text{et}} n^+ N - \gamma_{\text{ch}} N p, \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{4[\sigma^+ n^+ + (B\phi/2)] \phi}{h\nu} - \gamma_{\text{hd}} (n_0 - n^+) p - \gamma_{\text{ch}} N p, \quad (6)$$

其中  $\phi$  为腔内光子数密度,  $R_{\text{in}}$  为抽运速率, 可近似地表示为  $R_{\text{in}} = P_{\text{in}} [1 - \exp(-\alpha l)] / \hbar \nu_p \pi \omega_p^2 l$ .  $t_r$  为腔内的往返时间,  $t_r = [2n_1 l + 2n_2 d + 2n_3 l_k + 2(L_c - l - d - l_k)] / c$ ,  $c$  为真空中的光速.  $\tau$  为激活介质的受激辐射寿命.  $\delta_N$  为非线性损耗系数,  $\epsilon_0$  为介电常数,  $n_e^{\omega}, n_o^{\omega}, n_e^{\omega}$  为谐波和基频波的折射率,  $p_{2\omega}$  为输出绿激光的功率.  $n_1$  为激光晶体的折射率,  $n_2$  为 GaAs 的折射率,  $n_3$  为 KTP 晶体的折射率.  $l$  为激活介质长度,  $d$  为 GaAs 厚度,  $l_k$  为 KTP 的厚度,  $L_c$  为谐振腔光学长度.  $n$  为反转粒子数密度,  $n_0$  为缺陷能级 EL2 (包括 EL2<sup>0</sup>, EL2<sup>+</sup>) 上总的粒子数密度,  $n^+$  为带正电部分 (EL2<sup>+</sup>) 的粒子数密度,  $N$  为电子密度.  $p$  为空穴密度,  $\sigma$  为激活介质的受激发射截面,  $\sigma^0, \sigma^+$  分别为 EL2<sup>0</sup>, EL2<sup>+</sup> 的吸收截面,  $\sigma_f$  为自由载流子的吸收截面.  $L$  为腔内损耗,  $h\nu$  为光子能量.  $\gamma_{\text{et}}, \gamma_{\text{ch}}, \gamma_{\text{hd}}$  分别为 EL2<sup>+</sup> 与电子, 电子空穴, EL2<sup>0</sup> 与空穴的复合系数.  $P_{\text{in}}$  为抽运光功率,  $h\nu_p$  为抽运光的光子能量,  $\omega_p$  为抽运光在激活介质中的有效半径,  $\alpha$  为激活介质的吸收系数.  $B$  为 GaAs 中 TPA 的耦合系数, 其定义为<sup>[5]</sup>:  $B = 6\beta \hbar \nu c (\omega_0 / \omega_q)^2 d$ , 其中  $\beta$  为双光子的吸收系数,  $\omega_0, \omega_q$  为光束在激活介质和 GaAs 中的光斑大小. GaAs 的小信号透过率可表示为:  $T_0 = \exp\{-[\sigma^0 (n_0 - n^+) + \sigma^+ n^+] d\}$ . 对于 300  $\mu\text{m}$  和 580  $\mu\text{m}$  的

GaAs 片的小信号透过率分别为 96.8%, 93.8%。

利用速率方程(1)~(6),及表 2 给出的数据,通过计算机数值模拟,可得到在抽运功率 3.22 W 下,厚度为 300  $\mu\text{m}$  GaAs 调 Q 脉冲脉宽为 51 ns,重复率为 383 kHz,脉冲波形如图 4 虚线所示,可以看出理论和实验结果(图 4 实线)吻合得比较好。

表 2 方程组(1)~(6)对应的参数  
Table 2 Related parameters for Eqs. (1)~(6)

	Parameter	Ref.
$n(t=0)$	$[2\sigma^0(n_0 - n^+)d + 2\sigma^+ n^+ d + L]/2dl$	[9]
$\sigma$	$3.42 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	[11]
$\sigma^0$	$1.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$	[9]
$\sigma^+$	$2.3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$	[9]
$\sigma_f$	$6 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	[9]
$n_0$	$1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	[9]
$n^+$	$1.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	[9]
$\tau$	98 $\mu\text{s}$	[11]
$\beta$	$2.6 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1}$	[9]
$\gamma_{\text{et}}$	$1.9 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	[9]
$\gamma_{\text{eh}}$	$2.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	[9]
$\gamma_{\text{hd}}$	$3.4 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	[9]
$\omega_0$	252 $\mu\text{m}$	
$\omega_q$	156 $\mu\text{m}$	
$n_1$	2.183	[11]
$n_2$	3.48	[9]
$n_3$	1.83	
$l$	0.5 cm	
$l_k$	0.7 cm	
$L$	0.12	
$\omega_p$	0.25 mm	
$\alpha$	$5.32 \text{ cm}^{-1}$	[11]

对于不同的  $P_{\text{in}}$ ,由方程(1)~(6)得到不同抽运功率、不同 GaAs 厚度条件下,调 Q 脉冲宽度、重复率、单脉冲能量及脉冲峰值功率的数值解,图 3 (a)~(e)中的实线和虚线分别为厚度为 300  $\mu\text{m}$ , 580  $\mu\text{m}$  GaAs 的理论曲线,可以看到理论计算和实验结果基本相符。

由于腔内调 Q 插入损耗比较大,包括饱和吸收体、热透镜效应、衍射损耗,导致了实验光-光转换效率低,所得的单脉冲能量和峰值功率比较低,1%基频光的损耗将导致 20%的二次谐波的损耗<sup>[11]</sup>。如果提高饱和吸收体的抛光程度,并加以冷却,转换效率、单脉冲能量和峰值功率还会有所提高。

实验中观察到厚 580  $\mu\text{m}$  GaAs 片调 Q 输出脉冲的稳定度高于厚 300  $\mu\text{m}$  GaAs 的,由于调 Q 脉冲之间会产生互相扰动,比较薄的 GaAs 片产生的重

复率高,脉冲相互扰动的几率要明显大于较厚的 GaAs 片,另外可饱和吸收体漂白重新恢复需要时间,这期间外界随机变化会使激光介质的上能级反转粒子数不一致,也会影响脉冲的稳定性。

## 4 结 论

利用不同厚度的 GaAs 实现了激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 激光器的三镜折叠腔的被动调 Q 运转。在抽运功率 3.22 W 下 300  $\mu\text{m}$  厚的 GaAs 得到了 381 kHz 的高重复率,53.2 ns 的脉冲宽度,脉冲能量为 0.18  $\mu\text{J}$ ,并将此实验结果与厚度为 580  $\mu\text{m}$  的 GaAs 作了比较。在理论方面给出了描述内腔倍频 GaAs 调 Q 工作原理的耦合波方程组,所得的理论值与实验结果相符。

## 参 考 文 献

- 1 D. L. Sipes. Highly efficient neodymium; yttrium aluminum garnet laser end-pumped by a semiconductor laser array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**:74~76
- 2 J. Berger, D. F. Welch, D. R. Scifer *et al.*. High power, high efficient neodymium; yttrium aluminum garnet laser end-pumped by a laser diode array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(16):1212~1214
- 3 T. T. Kajava, A. L. Gaeta. Q switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with GaAs [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(16):1244~1246
- 4 Li Ping, Wang Qingpu, Gao Da *et al.*. Study of passively Q-switched Nd:YAG laser with GaAs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):744~749  
李平,王青圃,高达等. GaAs 被动调 Q Nd:YAG 激光器激光特性的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6):744~749
- 5 T. T. Kajava, Alexander L. Gaeta. Intra-cavity frequency-doubling of a Nd:YAG laser passively Q-switched with GaAs [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **137**:93~97
- 6 Chen Weibiao, Nobuo Takeuchi. Diode pumped, Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):385~388  
陈卫标, Nobuo Takeuchi. LD 抽运的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):385~388
- 7 Li Ping, Wang Qingpu, Zhang Xingyu *et al.*. Study of a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser passively Q Switched with GaAs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3):298~302  
李平,王青圃,张行愚等. 激光二极管抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> GaAs 被动调 Q 激光器研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3):298~302
- 8 Jiaan Zheng, Shengzhi Zhao, Qingpu Wang *et al.*. Influences of thermal effect on KTP type-II phase-matching second-harmonic generation [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **199**:207~214
- 9 A. L. Smirl, G. C. Valley, K. M. Bohnert *et al.*. Picosecond photorefractive and free-carrier transient energy transfer in GaAs at 1  $\mu\text{m}$  [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(2):289~303
- 10 Lei Chen, Shengzhi Zhao, Hongming Zhao. Passively Q-switching of a laser-diode-pumped intracavity-frequency-doubling Nd:NYW/KTP laser with GaAs saturable absorber [J]. *Optics and Laser Technology*, 2003, **35**:563~567
- 11 J. A. Zheng, S. Z. Zhao, L. Chen. Laser-diode end-pumped passively Q-switched intracavity doubling Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP laser with Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(8),1970~1975