

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0298-05

# 激光二极管抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> GaAs 被动调 Q 激光器研究\*

李 平\*\* 王青圃 张行愚 赵圣之 王玉荣

(山东大学光学系, 济南 250100)

王继扬 黄伯标 张少军 刘训民

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

何京良 吕兴强

(山东师范大学物理系, 济南 250100)

摘要: 报道了激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 半导体材料 GaAs 被动调 Q 激光器运转。测量了不同透过率输出镜条件下, 输出调 Q 脉冲的宽度、能量及脉冲重复率。在抽运功率为 4 W 时, 得到了脉宽为 30 ns、能量为 8 μJ、重复率为 60 kHz 的稳定的调 Q 脉冲。还就 GaAs 调 Q 机理进行了理论研究并对实验中的一些现象进行了分析讨论。

关键词: GaAs; 被动调 Q; Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运的被动调 Q 全固态激光器是获得高重复率的纳秒、亚纳秒脉冲较理想的光源, 并有结构简单、体积小、成本低和效率高的优点, 具有广泛的应用前景, 因此, 对该种激光器的研究受到人们的极大关注<sup>[1-5]</sup>。半导体材料由于其能带间隙和能级寿命可以利用先进的金属有机化学汽相淀积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, 因此从理论上讲, 几乎所有的固体激光器都可以选择适当的半导体单晶或半导体化合物材料来实现被动调 Q 运转<sup>[6]</sup>, 所以用半导体材料代替染料在固体激光器中实现被动调 Q 的研究越来越受到人们的重视。近几年, 国外已经先后报道了利用 InGaAs、GaAs 以及半导体量子阱非谐振法布里-珀罗饱和吸收体实现 Nd:YAG 激光器被动调 Q 运转的研究成果<sup>[6-8]</sup>, 我们也曾对氙灯抽运

GaAs 被动调 Q Nd:YAG 激光器进行了研究<sup>[9]</sup>, 虽然 GaAs 饱和损耗调制较小, 在氙灯抽运激光器中难以获得稳定的巨脉冲, 但相对比较而言, 它更适用于用作激光二极管抽运激光器的被动调 Q 开关。

本文从理论和实验两个方面对激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> GaAs 被动调 Q 激光器输出特性进行了研究。测量了不同透过率输出镜条件下, 输出调 Q 脉冲的宽度、能量及脉冲重复率随抽运功率的变化关系。就已有的研究结果来看, GaAs 被动调 Q 机理归因于深能级 EL2 上粒子的光电离所导致的可饱和单光子吸收(SPA)<sup>[7]</sup>, 然而 GaAs 内部的双光子吸收(TPA)和自由载流子(FCA)也将在调 Q 形成过程中起重要影响作用, 因此, 本文在考虑三种吸收机制的前提下, 给出了 GaAs 被动调 Q 速率方程, 对方程进行了理论模拟, 进一步分析了 GaAs 三种吸收机制在调 Q 形成过程中的作用, 并对一些实验现象进行了解释。

## 2 实 验

实验装置如图 1 所示。采用平-凹腔, 激光工作物质是 3 mm × 3 mm × 5 mm 的、原子数分数为 0.007Nd 掺杂的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体一端

\* 中国博士后基金和山东大学青年基金资助课题。

\*\* 现通讯地址: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; E-mail: pingli@sdu.edu.cn

收稿日期: 2001-01-02; 收到修改稿日期: 2001-04-16

镀 1.06 μm 全反膜直接作为激光腔的后腔镜,该膜同时对 808 nm 的抽运光高透,另一端镀 1.06 μm 增透膜。输出镜为曲率半径 50 cm 的凹面镜,反射率为 90%。抽运源采用带光纤耦合输出的 OPC-DO15-PS 型半导体激光器,其最高输出功率为 15 W。

为了提高 GaAs 中的功率密度,将一双面镀 1.06 μm 高透、焦距为 50 mm 的聚焦透镜放在腔内 GaAs 薄片的前面。将加工好的 GaAs 薄片插入激光腔输出镜与聚焦透镜之间,并靠近透镜焦点位置。GaAs 样品厚度为 580 μm,双面镀 1.06 μm 增透膜。实验中用 LPE-1C 型功率计测量激光平均功率,用 MRD500 型快速光电二极管和 TDS620B 型数字存储示波器对激光脉冲进行接收和显示。

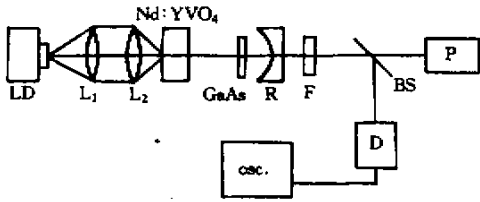


Fig.1 Schematic of the experimental setup. LD:laser diode; L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>:optical coupling system;R:concave reflector; F:filter P:power meter;BS:beam splitter;D:detector; Osc.:oscilloscope

增大抽运功率至 1 W,即可实现调 Q 激光输出,当 GaAs 薄片偏离透镜焦点处时,脉宽变宽,约为数百纳秒,重复率为 50 kHz~100 kHz,将 GaAs 薄片逐渐靠近透镜焦点处,发现脉宽明显减小,重复率下降。图 2 为抽运功率为 4 W 时得到的典型的调 Q 脉冲波形,此时脉宽为 30 ns,能量为 8 μJ,重复率为 60 kHz。

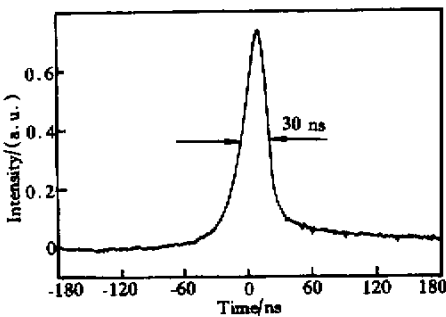


Fig.2 Typical wave form of the Q-switched pulse

图 3、图 4、图 5 分别给出了不同输出透过率条件下,脉冲宽度、单脉冲能量、脉冲重复率随抽运功率的变化关系。由图 3、图 4 可以看出,随着抽运功率的提高,脉冲宽度明显减小,单脉冲能量增大。其

中脉冲宽度随抽运功率的提高而变小是由于 GaAs 受更高激光辐射时,可以实现更快的吸收饱和,而单脉冲能量随抽运功率的提高而明显增大因而与传统的可饱和调 Q 结果不同,但是这一结果与下面给出的脉冲重复率随抽运功率提高而减低的实验结果是一致的。

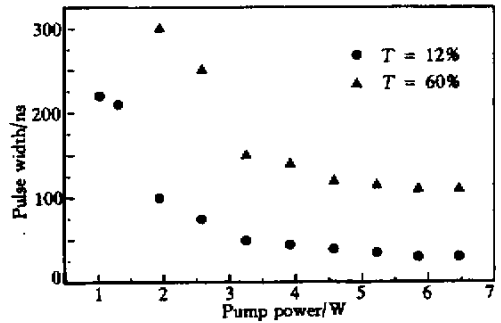


Fig.3 Pulse width versus pumping power for different output coupler transmission T

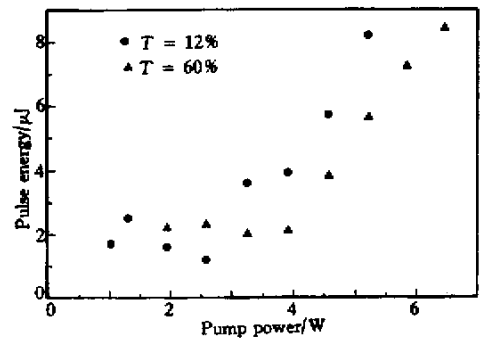


Fig.4 Pulse energy versus pumping power for different output coupler transmission T

图 5 表明,当抽运功率在阈值附近时,脉冲重复率随抽运功率的提高而增高,然而继续提高抽运功率,脉冲重复率却出现了下降的趋势,这种随抽运功率的提高重复率下降的现象与传统的其他被动调

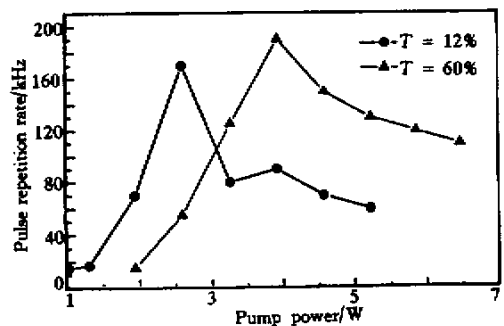


Fig.5 Pulse repetition rate versus pumping power for different output coupler transmission T

Q 开关不同,该现象在 GaAs 被动调 Q Nd:YAG 激光器中同样存在<sup>[7]</sup>。

实验发现 GaAs 作为被动调 Q 开关,具有较好的稳定性,输出调 Q 脉冲非常稳定,对于 580  $\mu\text{m}$  厚的 GaAs 样品,当抽运功率不变时,通过调节腔内透镜位置,可以实现脉冲幅度起伏小于 3%,而脉冲与脉冲间隔跳动小于 2%。同时发现 GaAs 具有较高的抗光损伤阈值,实验过程未出现光损伤现象。

### 3 理 论

由于 1.06  $\mu\text{m}$  波长光子能量远小于 GaAs 能带间隙(1.42 eV),当 GaAs 受 1.06  $\mu\text{m}$  激光辐射时,其内部产生的吸收主要是由位于导带下 0.82 eV 处深能级 EL2 上粒子光电离所致,该吸收为线性吸收并随着辐射光强的增加而趋于饱和<sup>[10]</sup>。当辐射光强增加时 GaAs 内部还将产生双光子吸收和自由载流子吸收,考虑以上三种吸收机制,可给出 GaAs 被动调 Q 激光器速率方程如下<sup>[11,12]</sup>:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{[2\sigma Nl - 2\alpha l_q - 2\sigma_f n l_q - \ln(1/R) - L]\phi - B\phi^2}{t_r} \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = -2c\sigma N\phi - \frac{N}{\tau} + P_u(N_{\text{tot}} - N), \quad (2)$$

式中  $\phi$  为腔中光子数密度,  $N$ 、 $\sigma$ 、 $l$  分别为激活介质的反转粒子数密度、受激发射截面和长度,  $c$  为真空中光速,  $\sigma_f$  为自由载流子吸收截面,  $n$  为自由载流子数密度(近似等于自由电子或自由空穴粒子数密度,故可以自由电子数密度代替)<sup>[12]</sup>,  $t_r$  为光在腔内往返一周的时间,  $R$  为输出镜反射率,  $L$  为腔内往返损耗,  $\tau$  为激光上能级寿命,  $P_u$  为抽运几率,  $N_{\text{tot}}$  为工作物质总的原子数密度,  $l_q$  为 GaAs 样品的厚度,  $\alpha$  为 GaAs 线性吸收系数,由于该吸收是由深能级 EL2 上粒子的光电离所致,所以  $\alpha$  可表示为

$$\alpha = \sigma^0(N^0 - N^+) + \sigma^+ N^+, \quad (3)$$

式中  $N^0$  为深能级 EL2 总的粒子数密度,  $N^+$  为带正电部分(EL2<sup>+</sup>)的粒子数密度,  $\sigma^0$ 、 $\sigma^+$  分别为 EL2<sup>0</sup>、EL2<sup>+</sup> 上粒子吸收截面。在(1)式中,  $B$  为双光子吸收耦合系数<sup>[12]</sup>:

$$B = 6\beta h\nu c l_q (\omega_0/\omega_q)^2/n_q, \quad (4)$$

式中  $\beta$  为双光子吸收系数,  $h$  为普朗克常量,  $\nu$  为激光光波频率,  $n_q$  为 GaAs 折射率。其他几个相关方程为

$$\frac{dN^+}{dt} = 2\phi_q[(N^0 - N^+)\sigma^0 - \sigma^+ N^+]l_q/t_r \quad (5)$$

$$\frac{dn}{dt} = [2\phi_q(N^0 - N^+)\sigma^0 + B\phi^2/2]l_q/t_r, \quad (6)$$

式中  $\phi_q$  为 GaAs 中光子数密度,由于谐振腔中放置了聚焦透镜,所以给出了  $\phi_q$  的一般表达式:

$$\phi_q = \phi(\omega_0/\omega_q)^2, \quad (7)$$

式中  $\omega_0$ 、 $\omega_q$  分别为激光束在激光工作物质和 GaAs 薄片上光斑的半径。

为了研究 GaAs 中各种吸收机制在调 Q 过程中的作用,我们分别考虑深能级吸收和双光子吸收(SPA + TPA)以及同时考虑包括自由载流子吸收的三种吸收(SPA + TPA + FCA)情况下,对(1)式~(7)式进行了数值求解,得到光子数密度随时间的变化关系如图 6 所示,图中还给出了实验中用数字存储示波器记录的脉冲波形。为了比较,图中所有脉冲峰值功率已被归一化成相同值。方程求解所用参量如表 1 所示。

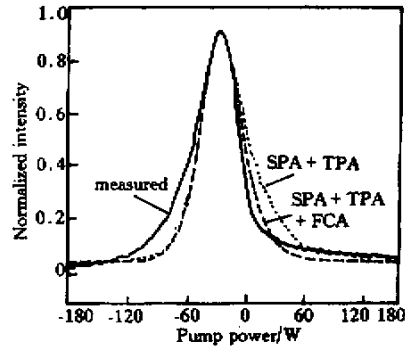


Fig. 6 Measured and simulated pulse profiles of GaAs Q-switching

Table 1 Related parameters in Eqs.(1)~(7)

parameters	value
$\sigma$ simulated emission cross-section	$2.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$
$\tau$ spontaneous fluorescence lifetime	98 $\mu\text{s}$
$l$ length of the laser rod	5 mm
$t_r$ round trip time in cavity	1 ns
$h\nu$ photon energy	$1.86 \times 10^{-19} \text{ J}$
$\omega_0/\omega_a$ ratio of the spot size at the laser rod and the spot size at the GaAs wafer	1.1
$\sigma^0$ EL2 <sup>0</sup> absorption cross section	$1.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
$\sigma^+$ EL2 <sup>+</sup> absorption cross section	$2.3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$
$\sigma_f$ free-carrier absorption cross section	$6 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$
$\beta$ two-photon absorption coefficient	26 cm/GW
$l_q$ length of GaAs wafer	580 $\mu\text{m}$
$N^0$ total EL2 density	$1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
$N^+$ initial ionized EL2 <sup>+</sup> density	$1.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
$\gamma_{\text{eh}}$ electron-hole recombination coefficient	$2.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
$\gamma_{\text{he}}$ hole-EL2 recombination coefficient	$1.9 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
$\gamma_{\text{ef}}$ electron-EL2 <sup>+</sup> recombination coefficient	$3.4 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

由图 6 可以看出,深能级光电离所导致的可饱和吸收(SPA)是 GaAs 实现调 Q 的主要因素,同时双光子吸收和自由载流子吸收也有影响。在考虑深能级可饱和吸收和双光子吸收情况下,脉冲理论波形较只考虑深能级可饱和吸收所得波形有一定程度的展宽,峰值功率下降。这是因为随着腔内光强进一步增强,双光子吸收将变得越来越重要,当腔内光脉冲的峰值功率密度在 200 MW/cm<sup>2</sup> 时,双光子吸收将占主要地位<sup>[13]</sup>,并开始限制 GaAs 中的光的透过率,使得调 Q 脉冲在其峰值附近经历最高的损耗,造成调 Q 脉冲的展宽,峰值功率下降。由图可以看出,考虑自由载流子吸收后,调 Q 脉冲波形成后沿下降更快,从而缩短了激光脉冲,并提高了调 Q 脉冲峰值功率。同时考虑 GaAs 内部的三种吸收机制所得出的理论结果与实验结果能更好地相吻合,从而证实了在 GaAs 调 Q 过程中,深能级的可饱和吸收(SPA)、非线性的双光子吸收(TPA)以及自由载流子吸收(FCA)共同起着重要的作用。

## 4 讨 论

1) 由图 2 可见, GaAs 调 Q 脉冲波形与其他传统的被动调 Q 开关(如染料)所得的脉冲波形相比,具有较好的对称性。对于高纯度的 GaAs 样品,自由载流子的寿命约为数十至一百纳秒,因此在调 Q 脉冲的后沿期间,自由载流子密度将由于双光子吸收而变得很大,达到 10<sup>17</sup> 量级<sup>[14]</sup>,如此大量的自由载流子产生的吸收将在脉冲形成的后沿处带来更多的损耗,从而加束脉冲后沿的下降,使调 Q 脉冲波形较为对称。

2) 由图 5 可以看出,随抽运功率的提高,脉冲重复率出现了下降的趋势,这种随抽运功率的提高而重复率下降的现象与传统的其他被动调 Q 开关不同,该现象在激光二极管抽运的 GaAs 被动调 Q Nd:YAG 激光器中同样存在<sup>[7]</sup>。其详细的理论机制尚需进一步研究,不过我们认为 GaAs 材料的热效应可能是导致这一现象的主要原因。随着抽运功率不断提高, GaAs 材料热效应越来越显著,导致 GaAs 可饱和特性发生变化,引起弱光透过率减小,结果表现为脉冲重复率降低。另一方面,当抽运功率升高到一定程度,腔内光强急剧增加,导致 GaAs 中双光子吸收迅速增大,同时 GaAs 中被强光激发出的自由载流子数量增多,导致其呈现负的折射率系数分布,相当于一块负透镜,这样,腔内振荡的光

脉冲波前相位也受到扰动,使光脉冲的非线性损耗增大,限制了光脉冲的透过<sup>[15]</sup>,也会导致脉冲重复率的下降。

结论 利用 GaAs 实现了激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 被动调 Q 运转,在抽运功率为 4 W 时,得到了脉宽为 30 ns,能量为 8 μJ,重复率为 60 kHz 的调 Q 脉冲。脉冲与脉冲之间幅度起伏以及脉冲与脉冲间隔起伏均小于 2%,克服了染料等调 Q 激光器输出脉冲不稳定的问题。在理论方面,从建立的激光器速率方程出发,进行了理论模拟,从理论上分析了 GaAs 被动调 Q 机理,证明了在 GaAs 被动调 Q 过程中,不仅单光子饱和吸收起作用,双光子吸收和自由载流子吸收也同时具有重要影响,理论模拟与实验结果符合得很好。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Q, Zhao S, Zhang X *et al.*. Laser demonstration of a diode-laser-pumped Nd: Sr<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F crystal. *Opt. Commun.*, 1996, **128**(123):73~75
- [2] Zayhowski J J, Dill C. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18):1427~1429
- [3] Zhang X, Wang Q, Zhao S. Laser diode pumped Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched Nd:S-FAP laser. *Opt. Commun.*, 1998, **155**(13):55~60
- [4] Li Ping, Wang Qinpu, Zhang Xinyu *et al.*. Nd: Sr<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F crystal laser characteristics using GaAs as passive Q-switch. *Chinese J. Lasers* 2000, **27**(2):107~110
- [5] Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Laser-diode-pumped Cr<sup>4+</sup>:YAG repetitively Q-switched Nd<sup>3+</sup>:YAG laser. *Chinese J. Laser*(中国激光), 1999, **22**(8):678~682 (in Chinese)
- [6] Tsou Y, Garmire E, Chen W *et al.*. Passive-Q-switching of Nd:YAG lasers by use of bulk semiconductors. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(18):1514~1516
- [7] Kajava T T, Gaeta A L. Q switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with GaAs. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(16):1244~1246
- [8] Braun B, Kartner F X, Zhang G *et al.*. Passively Q-switched 180-ps Nd:LaSc<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> microchip laser. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9):1020~1022
- [9] 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)
- [10] Smirl A L, Valley G C, Bohnert K M *et al.*. Picosecond photorefractive and free-carrier transient energy transfer in GaAs at 1 μm. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(2):289~303
- [11] Wang Qinpu, Zhang Xingyu, Zhao shengzhi. *Laser Physics*(激光物理学). Ji'nan:Shandong University

Publishing House, 1993. 254~318 (in Chinese)

- [ 12 ] Kajava T T , Gaeta A L. Intra-cavity frequency-doubling of a Nd:YAG laser passively Q-switched with GaAs. *Opt. Commun.*, 1997, **137**( 3 ) 93~97
- [ 13 ] Boggess T F , Smirl A L , Moss S C *et al.*. Optical limiting in GaAs. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**( 5 ) 488~493
- [ 14 ] Valley G C , Smirl A L. Theory of transient energy transfer in gallium arsenide. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **QE-24**( 2 ) 304~310
- [ 15 ] Wang Zhenglin , Guo Qiang , Wang Lin *et al.*. Stable passively model-locked Nd:YAG with intracavity GaAs negative feedback element. *Chinese J. Quant. Electron.* ( 量子电子学报 ), 1997, **14**( 5 ) 433~436 (in Chinese)

## Study of a Diode-Pumped Nd:YVO<sub>4</sub> Laser Passively Q Switched with GaAs

Li Ping Wang Qingpu Zhang Xingyu Zhao Shengzhi Wang Yurong  
( Department of Optics , Shandong University , Ji'nan 250100 )

Wang Jiyang Huang Bobiao Zhang Shaojun Liu Xunmin  
( Institute of Crystal Materials , Shandong University , Ji'nan 250100 )

He Jingliang Lu Xingqiang  
( Department of Physics , Shandong Normal University , Ji'nan 250100 )  
( Received 2 January 2001 ; revised 16 April 2001 )

**Abstract :** A passively Q-switched laser diode end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser is demonstrated in which a GaAs film is used as the saturable absorber. The pulse width , pulse energy and pulse repetition rate of different output coupler are measured. At 4 W pumping power , stable laser pulse as short as 30 ns with 8 μJ energy and 60 kHz pulse repetition rate can be generated with this laser. Meanwhile , the Q-switching dynamics is theoretically studied based on the rate equations. Some phenomena generated in the laser are analyzed.

**Key words :** GaAs ; passive Q-switching ; Nd:YVO<sub>4</sub> laser