

LD 抽运 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 高重复率被动调 Q $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 激光器*

王加贤 庄鑫巍

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 采用 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体作为可饱和吸收体, 实现连续激光二极管(LD)端面抽运的 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 激光器的高重复率被动调 Q. 在注入抽运功率为 8.8 W 时, 得到重复频率 23.8 kHz、平均功率 1.21 W 的调 Q 脉冲序列; 每个脉冲能量为 51 μJ 、脉宽为 25 ns、峰值功率达到 2.03 kW. 实验上研究了脉冲重复频率、平均输出功率、脉冲宽度、单脉冲能量与抽运功率、输出镜透过率的关系. 实验结果表明, 当抽运功率较大时, 脉冲重复频率和输出平均功率随着抽运功率的增加而减小, 对此进行了合理的理论解释.

关键词 激光技术; 激光二极管(LD)抽运; $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体; $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 激光器; 被动调 Q

中图分类号 TN245; TN248.1

文献标识码 A

0 引言

激光二极管(LD)抽运的 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 激光器具有结构紧凑、稳定性好、使用寿命长、转换效率高优点而受到广泛重视. 为了获得高功率的纳秒激光脉冲以满足测距、遥感、定标、激光雷达等领域的应用, 人们通常在脉冲抽运和连续抽运的激光器中分别采用电光调制器和声光调制器进行主动调 Q. 然而, 更为简便的方法是采用被动调 Q, 因为它不需要外部驱动电路, 可即插即用. 1988 年出现的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体在 0.9~1.2 μm 波长范围内有显著的可饱和吸收特性, 而且具有光化学性质稳定、热导性能好、饱和光强低及损伤阈值高等优点, 是 Nd 激光器合适的被动调 Q 器件, 它已成功地用于灯抽运和 LD 抽运的连续或脉冲 $\text{Nd} : \text{YAG}$ 激光器的被动调 Q, 以及 LD 抽运的 $\text{Nd} : \text{GdVO}_4$ 激光器的被动调 Q, 获得时间宽度几纳秒到几十纳秒的激光脉冲^[1~5]. 然而, 由于 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 晶体的受激辐射截面大、上能级寿命短、储能较低, 所以在 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 激光器中实现被动调 Q 相对比较困难. 尽管如此, 近年来也相继在 LD 抽运的 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 激光器中采用 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 和 GaAs 作为可饱和吸收体实现高重复率被动调 Q^[6~10], 但这些研究大多采用低功率的 LD 抽运.

本文报道在较大功率的 LD 连续抽运下, $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 对 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 激光器的高重复率被动调 Q,

研究抽运功率、输出镜透过率对激光器输出平均功率、脉冲重复频率、脉冲宽度和单脉冲能量的影响. 采用小信号透过率 63% 的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 作为可饱和吸收体, 在注入 8.8 W 的抽运功率下, 得到重复频率 23.8 kHz、平均功率 1.21 W 的调 Q 脉冲序列; 单脉冲时间宽度 25 ns、能量 51 μJ 、峰值功率达到 2.03 kW. 实验中发现, 当抽运功率较大时, 调 Q 脉冲重复频率和输出平均功率都随着抽运功率的增加而减小. 脉冲重复频率随抽运功率的增加而减小的现象在 LD 抽运的 GaAs 被动调 Q $\text{Nd} : \text{YAG}$ 激光器中出现过^[11], 但输出平均功率和脉冲重复频率同时随着抽运功率的增加而减小的现象在 LD 抽运的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q $\text{Nd} : \text{YAG}$ 和 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 激光器中尚未见报道.

1 实验装置

LD 连续抽运的 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 被动调 Q 激光器实验装置如图 1. 最大输出功率 12 W 的半导体激光器, 由芯径 600 μm 、数值孔径 0.22 的光纤耦合输出, 再经泵浦耦合镜头准直聚焦后, 端面抽运 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 晶体; LD 带有微通道冷却, 25 $^{\circ}\text{C}$ 时发射中心波长为 $(808 \pm 3) \text{ nm}$ 激光, 这样可有效保证发射中心波长与 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 的吸收峰匹配. $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 晶体采用 a 向切割, 尺寸为 $4 \times 4 \times 8 \text{ mm}^3$, 二个通光面镀上 808 nm 和 1064 nm 激光的增透膜, 晶体用微通道热沉通水冷却. $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 激光器采用简单的平凹腔结构, 腔长 15 cm. M_1 是对 808 nm 高透、同时对 1064 nm 高反的曲率半径 50 cm 的凹面镜; M_2 是对 808 nm 高透、同时对 1064 nm 有一定透过率的平面输出镜; SA 是作为可饱和吸收体的 $\text{Cr}^{4+} :$

* 国务院侨办科研基金(05QZR11)和福建省自然科学基金(A0310022)资助项目

Tel: 0595-22691065 Email: wangjx@hqu.edu.cn

收稿日期: 2005-08-26

YAG 晶体, 它的通光长度 2 mm, 两面抛光并镀上 1064 nm 增透膜, 对 1064 nm 激光的小信号透过率为 63%. 该晶体夹在两片钻有适当小孔的铜片之间, 小孔可作为选择单横模的光阑, 铜片置于热沉板上通循环水冷却, 冷却水的温度控制在 20°C, 晶体置于增益介质和平面输出镜之间, 与平面输出镜距离 5 cm. 输出激光由 PIN 硅快速光电二极管接收, 并输入到 H. P. 公司的 300 MHz 存储示波器上观察和显示脉冲波形; 用 Molectron Detector 公司的功率计测量激光功率.

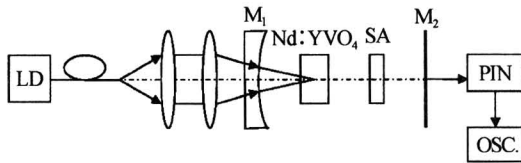


图 1 LD 抽运 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q Nd: YVO₄ 激光器
Fig. 1 Schematic diagram of Cr^{4+} : YAG passively Q-switched Nd: YVO₄ laser pumped by laser diode

2 实验结果与分析

2.1 激光器输出特性

采用透过率 15% 的平面输出镜, 未插入 Cr^{4+} : YAG 晶体时, 激光器处于连续运转状态. 精细调整激光器后, 连续运转的阈值抽运功率 (抽运功率指 Nd: YVO₄ 晶体吸收的功率, 下同) 为 1.02 W; 当抽运功率为 8.8 W 时, 输出的 1064 nm 基横模连续激光的功率为 3.42 W, 光-光转换效率为 38.9%.

将 Cr^{4+} : YAG 晶体插入谐振腔内, 实现了 LD 端面连续抽运的 Nd: YVO₄ 激光器的高重复率被动调 Q, 调 Q 运转的阈值抽运功率为 4.78 W. 当抽运功率为 8.8 W 时, 调 Q 输出的平均功率为 1.21 W, Q 开关提取效率 (指调 Q 输出平均功率与连续输出功率之比) 为 35.4%, 光-光转换效率为 13.8%. 示波器上观察到的 8.8 W 抽运功率下调 Q 脉冲序列和相应展开后的单脉冲波形分别如图 2(a)、(b). 可以看出: 调 Q 脉冲序列基本上是等幅度、等间隔的, 脉冲间隔时间约为 42 μs , 即脉冲重复频率为 23.8 kHz, 脉冲幅度抖动小于 4%, 脉冲频率抖动小于 5%, 调 Q 脉冲的时间宽度 (半峰全宽) 为 25 ns. 由输出平均功率除以脉冲重复率, 可以求得单个脉冲的能量为 51 μJ ; 脉冲能量除以脉冲时间宽度, 可得脉冲峰值功率为 2.03 kW. 被动调 Q 与主动声光调 Q 相比, 可饱和吸收体被漂白后重新恢复吸收的时间较长, 在这期间外界随机变化会导致增益介质上的初始反转粒子数不一致, 同时脉冲之间存在着相互干扰, 这些因素对幅度稳定性和频率稳定性都会产生影响, 所以幅度和频率的微小抖动是难免的.

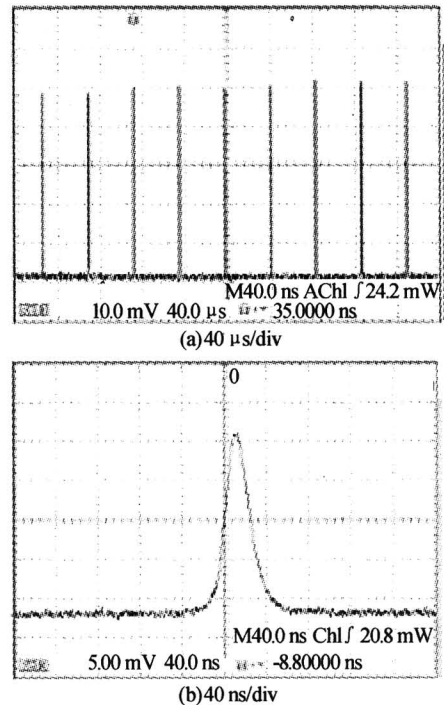


图 2 (a) 调 Q 脉冲序列和 (b) 单脉冲波形

Fig. 2 (a) Q-switched pulse trains and (b) Single pulse shape

2.2 抽运功率对调 Q 激光性能的影响

在阈值以上改变抽运功率, 激光器输出的平均功率、脉冲重复频率、脉冲宽度、单脉冲能量都随之改变. 图 3 为采用不同透过率的输出镜时, 输出平

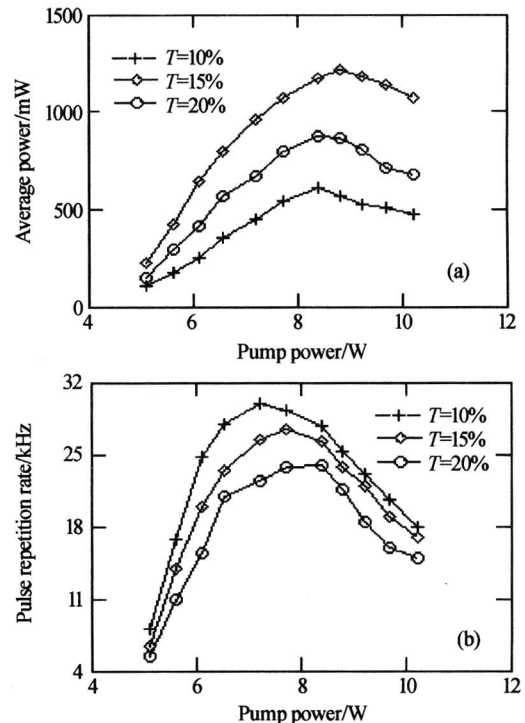


图 3 采用不同输出耦合 T 时, 平均功率 (a) 和脉冲重复率 (b) 随抽运功率的变化

Fig. 3 Average output power (a) and pulse repetition rate (b) versus pump power for different output coupler transmission T

均功率和脉冲重复率随抽运功率的变化情况. 从图 3(a)可以看出, 调 Q 输出平均功率先是随着抽运功率的增加而增加, 达到最大值后则随着抽运功率的增加而减小. 当抽运功率较大时, 平均功率随抽运功率的增加而减小的主要原因是, 增益介质的激发态吸收和能量传递上转换起作用. 激发态吸收使得激光上能级的 Nd 粒子吸收抽运光而跃迁到较高能级; 上转换过程是处于激光上能级的两个 Nd 粒子相互作用, 其中一个粒子跃迁到激光下能级, 另一个粒子被激发到较高能级^[12]. 考虑上述两种因素, 在 Q 开关打开前, 上能级 Nd 粒子数密度的变化率为

$$\frac{dN_2}{dt} = R - \frac{N_2}{\tau} - \gamma N_2^2 - \frac{c}{n} N_2 \sigma_e R \quad (1)$$

式中 R 为抽运速率, τ 为增益介质上能级寿命, γ 为上转换概率, σ_e 为激发态吸收截面, c 为光速, n 为增益介质的折射率.

由于激发态吸收正比于上能级粒子数密度与抽运功率的乘积, 上转换速率正比于上能级粒子数密度的平方, 所以在较大功率抽运下, 上述两种效应更加明显, 特别是上转换会减少上能级粒子的大量聚集, 对激光运转有削弱作用. 另外, 当抽运功率较大时, 腔内光强较大, 引起 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 较强的激发态吸收, 激发态吸收消耗了 1064 nm 激光, 使输出功率下降. 当然, 热效应形成的热透镜使腔偏离原来的状态, 对激光输出也会有一定的影响, 但是在良好的导热和冷却条件下, 它的作用并不是主要的.

从图 3(b)可以看出: 当抽运功率较小时, 调 Q 脉冲重复频率随着抽运功率的增加而快速增加, 而后逐渐趋缓, 达到最大值后则随着抽运功率的增加而减小. 抽运功率较小时, 脉冲重复频率随着抽运功率的增加而增加的解释是, 抽运功率的增加使得 Nd : YVO_4 上能级粒子数聚集的速度增加, 腔内净增益系数变大, 增益达到阈值所需的时间变短, 所以两次漂白可饱和吸收体的时间间隔也相应变短, 减小了调 Q 周期, 提高了脉冲的重复频率. 然而, 随着抽运功率的进一步增加, 脉冲重复频率反而下降, 这种现象在 GaAs 和 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被动调 Q 的 LD 抽运的 Nd : YVO_4 激光器中同样出现过^[13,14]. 其原因可能是多种因素的共同作用: 1) 当抽运功率增加到一定程度时, $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 的激发态吸收加剧, 减小了 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 上能级的粒子数, 延长了 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 被漂白的的时间; 2) 随着抽运功率的增加, $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 的热效应显著, 使得它的饱和吸收特性发生变化, 使小信号透过率减小, 更加不容易饱和, 所以 Q 开关打开的时间也延长; 3) 当抽运功率较大时, 增益介质的激发态吸收和能量传递上转换的作

用使得增益介质上能级的粒子数下降, 所以自发辐射的光强较小, 不易使吸收体饱和.

脉冲宽度和单脉冲能量与抽运功率的关系如图 4(取输出镜透过率为 10% 和 15%). 从图 4(a)可以看出, 脉冲宽度随着抽运功率的增加而减小, 这种倾向在阈值附近比较明显. 这是因为在抽运功率较小时, 随着抽运功率的增加, 腔内净增益系数变大, 腔内光子数的增长及反转粒子数的衰减更迅速, 所以脉冲的建立及熄灭过程就更短, 脉冲变窄. 在较高抽运功率下, $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 的激发态吸收和热效应使得它更不易漂白, 相当于 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 小信号透过率的减小和腔插入损耗的增大, 这就造成激光脉冲变窄. 图 4(b)表明, 在阈值附近单脉冲能量随着抽运功率的增加略有下降; 当抽运功率较大时, 则随着抽运功率的增加而增加, 这一结果与输出平均功率和脉冲重复率随抽运功率的变化是相符合的.

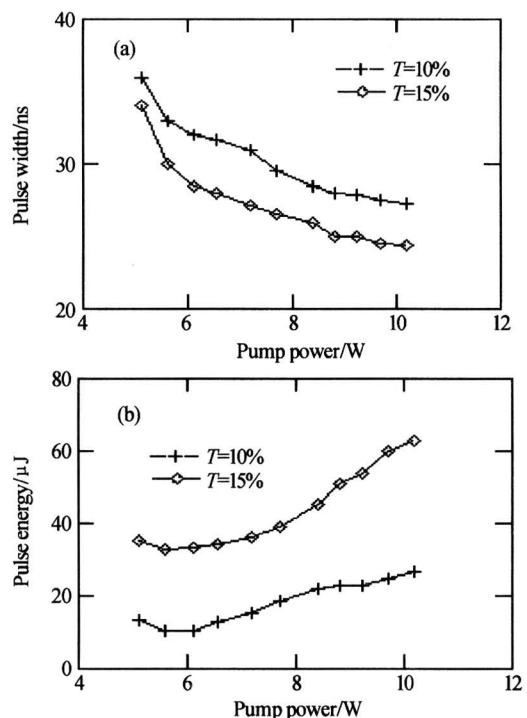


图 4 不同输出耦合 T 时, 脉冲宽度(a)和单脉冲能量(b)随抽运功率的变化

Fig. 4 Q-switched pulse width (a) and single pulse energy (b) versus pump power for different output coupler transmission T

2.3 输出镜透过率对调 Q 脉冲的影响

分别采用透过率 $T=10\%$ 、 15% 、 20% 的平面输出镜进行实验, 比较不同输出耦合时, 调 Q 激光器输出平均功率、脉冲重复频率、脉冲宽度和单脉冲能量随抽运功率的变化情况, 实验结果如图 3、4. 表 1 比较了不同输出耦合时激光器连续和调 Q 运转时的阈值抽运功率 P_w 和 P_q , 在相同抽运功率下 (8.8 W) 的调 Q 输出平均功率 P_o 、脉冲重复频率 f 、脉冲宽

度 t 、脉冲峰值功率 P_m 。可以看出,采用不同输出耦合 T 时,调 Q 输出平均功率、脉冲重复频率、脉冲宽度和单脉冲能量随抽运功率的变化趋向大体相同。在相同的抽运功率下, $T=15\%$ 对应的输出平均功率最大, $T=20\%$ 的次之, $T=10\%$ 的最小; $T=10\%$ 对应的脉冲重复频率最大, $T=15\%$ 的次之, $T=20\%$ 的最小; $T=15\%$ 对应的脉冲宽度比 $T=10\%$ 的小,而 $T=15\%$ 对应的单脉冲能量比 $T=10\%$ 的大。应用调 Q 激光器的基本原理不难对这些实验结果给予解释。综合考虑各方面指标,特别是脉冲峰值功率,可认为采用 $T=15\%$ 的输出耦合是比较有利的。

表 1 不同输出耦合时激光器的运转特性

$T/\%$	P_w/W	P_q/W	P_o/W	f/kHz	t/ns	P_m/kW
10	0.91	4.47	0.57	25.3	28	0.80
15	1.02	4.78	1.21	23.8	25	2.03
21	1.13	5.10	0.87	21.7	23	1.74

3 结论

在连续 LD 抽运的 Nd: YVO₄ 激光器中插入 Cr^{4+} : YAG 进行被动调 Q, 获得输出平均功率 1.21 W, 重复频率 23.8 kHz、脉冲时间宽度 25 ns、峰值功率达 2.03 kW 的稳定脉冲序列。实验结果表明,当抽运功率较大时,调 Q 脉冲重复频率和输出平均功率均随着抽运功率的增加而减小,所以存在着最佳抽运功率。如果对激光器进一步优化设计,选择更合适透过率的 Cr^{4+} : YAG 晶体和谐振腔参量,可望得到更好的实验结果。

参考文献

- Shimony Y, Burshtein Z, Kalisky Y. Cr^{4+} : YAG as passive Q-switch and Brewster plate in a pulsed Nd: YAG laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1995, **31**(10): 1738~1741
- Shimony Y, Burshtein Z, Ben-Amar A, et al. Repetitive Q-switching of a CW Nd: YAG laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1996, **32**(2): 305~310
- 丁彦华, 欧阳斌, 徐军, 等. 连续 Nd: YAG 激光器中 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q 的稳定性和功率的提高. *中国激光*, 1997, **A24**(3): 197~201
Ding Y H, Ouyang B, Xu J, et al. *Chinese J Lasers*, 1997, **A24**(3): 197~201
- 张行愚, 赵圣之, 王青圃, 等. LD 抽运的 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q Nd: YAG 激光器. *中国激光*, 1999, **A26**(8): 678~682
Zhang X Y, Zhao S Z, Wang Q P, et al. *Chinese J Lasers*, 1999, **A26**(8): 678~682
- 李桂秋, 赵圣之, 杨克建, 等. LD 抽运 Nd: GdVO₄ 晶体 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q Nd: YAG 激光特性的研究. *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
- Bai Y, Wu N, Zhang J, et al. Passively Q-switched Nd: YVO₄ laser with a Cr^{4+} : YAG crystal saturable absorber. *App Opt*, 1997, **36**(12): 2468~2472
- 余锦. 量子阱二极管泵浦的 Nd: YVO₄/ Cr^{4+} : YAG 高重复率被动调 Q 激光器. *光学精密工程*, 2000, **8**(1): 23~25
Yu J. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(1): 23~25
- 杨成伟, 霍玉晶, 尹晓东, 等. 激光二极管抽运 Cr^{4+} : YAG 被动调 Q Nd: YVO₄ 激光器的实验研究. *中国激光*, 2004, **31**(1): 1~4
Yang C W, Huo Y J, Yin X D, et al. *Chinese J Lasers*, 2004, **31**(1): 1~4
- 杨克建, 赵圣之, 赵启明, 等. LD 泵浦 Nd: YVO₄ 晶体 GaAs 被动调 Q 激光器理论和实验研究. *光子学报*, 2005, **34**(2): 169~172
Yang K J, Zhao S Z, Zhao Q M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 169~172
- Zheng Q, Zhao L. LD-pumped passively Q-switched Nd: YAG/KTP green laser. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 60~62
- Kajava T T, Gaete A L. Q-switching of a diode-pumped Nd: YAG laser with GaAs. *Opt Lett*, 1996, **21**(16): 1244~1246
- 冯衍, 宋峰, 赵丽娟, 等. LD 抽运 Nd: YVO₄ 晶体中的上转换及其影响. *物理学报*, 2001, **50**(2): 335~340
Feng Y, Song F, Zhao L J, et al. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(2): 335~340
- 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 Optical Sinica*, 2002, **22**(3): 298~302
- 郑权, 赵岭. LD 泵浦 Nd: YVO₄/ Cr^{4+} : YAG 被动调 Q 绿光激光器. *激光与红外*, 2001, **131**(6): 338~339
Zheng Q, Zhao L. *Laser & Infrared*, 2001, **131**(6): 338~339

Cr^{4+} : YAG High Repetition Rate Passively Q-switched Nd : YVO₄ Laser Pumped by Laser Diode

Wang Jiaxian, Zhuang Xinwei

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021

Received date: 2005-02-16

Abstract The high repetition rate passively Q-switching of laser-diode end-pumped Nd : YVO₄ laser was realized by using Cr^{4+} : YAG as saturable absorber. The pulse train with average output power of 1.21 W, repetition rate of 23.8 kHz, pulse width of 25 ns, pulse energy of 51 μJ and peak power of 2.03 kW was obtained with the absorbed pump power of 8.8 W. The dependence of pulse repetition rate, average output power, pulse width and single pulse energy on pump power and the transmission of output mirror was experimentally carried out. The experimental results showed that the pulse repetition rate and average output power decreased with pump power increasing when the pump power reached a certain extent. The experiment results were reasonably analyzed and discussed.

Keywords Laser technology; Laser-diode-pump; Cr^{4+} : YAG crystal; Nd : YVO₄ laser; passive Q-switch



Wang Jiaxian was born in 1955 in Fujian Province. He received the Ph. D. degree in Optical Engineering from Tianjin University in 1999. He is now a professor in College of Information Science and Engineering, Huaqiao University. He has published more than 40 papers. His research fields include solid-state laser technology and device, laser physics.