

紧凑高效吉赫兹 1.34 μm Nd:GdVO₄/V:YAG 调 Q 锁模激光器

曹秋园^{1,2}, 彭继迎^{1,2}, 李祚涵^{1,2}, 韩 鸣^{1,2}

¹北京交通大学理学院激光研究所, 北京 100044;

²教育部发光和光信息重点实验室, 北京 100044

摘要 提出了一种紧凑高效的吉赫兹(GHz)1.34 μm Nd:GdVO₄/V:YAG 调 Q 锁模激光器。采用激光二极管进行端面抽运,将紧凑线性腔结构与透过率为 10% 的输出耦合镜相结合。优化了激光晶体的相关实验条件,理论分析了激光晶体的相关特性。实验中使用了 Nd:GdVO₄ 晶体, Nd³⁺ 离子掺杂质量分数为 0.2%, V:YAG 晶体的初始透过率为 83%。利用该晶体实现了重复频率高达 2 GHz 的锁模脉冲,所得锁模调制深度接近 100%,调 Q 锁模激光器的最大输出功率可达 715 mW。基于波动机制理论,模拟了单个调 Q 包络下的锁模脉冲图形,所得理论结果与实验结果相符。

关键词 激光器; 调 Q 锁模激光器; 高重复频率; Nd:GdVO₄; V:YAG

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.061407

Compact and Efficient GHz Nd:GdVO₄/V:YAG Q-Switched Mode-Locked Laser at 1.34 μm

Cao Qiuyuan^{1,2}, Peng Jiyong^{1,2}, Li Zuohan^{1,2}, Han Ming^{1,2}

¹Institute of Laser, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

²Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Beijing 100044, China

Abstract A compact and efficient GHz Nd:GdVO₄/V:YAG Q-switched mode-locked laser at 1.34 μm is proposed. A laser diode is used for end-pumping, and a compact and linear cavity is combined with an output coupler with transmittance of 10%. Correlation experimental conditions of laser crystal are optimized, and correlation properties of laser crystal are theoretical analyzed. A Nd:GdVO₄ crystal is used in experiment. The Nd³⁺ doping mass concentration is 0.2%, and the initial transmission of V:YAG crystal is 83%. The repetition rate of mode-locked pulse is up to 2 GHz, and nearly 100% mode-locked modulation depth can be obtained. The maximum output power of the Q-switched mode-locked laser is 715 mW. Based on the fluctuation mechanism theory, a mode-locked pulse figure of single Q-switched envelope is simulated, and the simulation results agree well with the experimental results.

Key words lasers; Q-switched mode-locked laser; high repetition rate; Nd:GdVO₄; V:YAG

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.4050

1 引言

二极管抽运调 Q 锁模激光器(QML)因其具有超短脉冲、小型化和高效率等优点,已经在诸多领域得到了广泛应用。1.34 μm 调 Q 锁模激光器已经广泛应用于光纤通信、光学测量和光学参量振荡器等领域^[1-5]。

收稿日期: 2017-01-22; 收到修改稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(61108021)、中央高校基本科研业务费专项资金(2013JBM091, S16JB00010)

作者简介: 曹秋园(1991—),女,硕士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: 14121563@bjtu.edu.cn

导师简介: 彭继迎(1980—),男,博士,副教授,主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: pengjiying@163.com(通信联系人)

此外,将皮秒 $1.34\ \mu\text{m}$ 激光系统与拉曼频移技术相结合,更易产生人眼安全波段 $1.5\ \mu\text{m}$ 的激光;将皮秒 $1.34\ \mu\text{m}$ 激光系统与倍频技术相结合,可以得到高效的红光输出,红光在医疗和信息存储等很多研究领域扮演着重要角色^[6-8]。

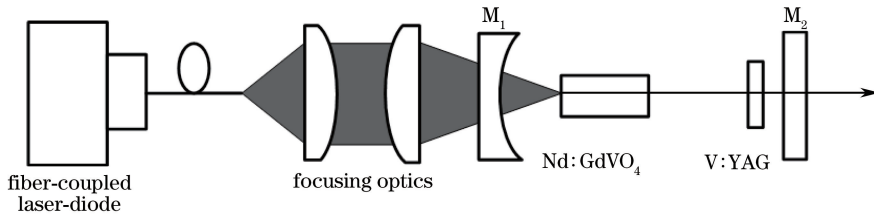
获得 $1.34\ \mu\text{m}$ 调 Q 锁模的有效方法是运用被动饱和吸收体,包括掺钒钇铝石榴石(V:YAG)晶体和镁铝尖晶石(Co:LMA)^[9-14]。V:YAG 在 $1.3\ \mu\text{m}$ 处拥有较大的基态吸收截面($7.2 \times 10^{-18}\ \text{cm}^2$)和较低的饱和能量密度(约为 $0.05\ \text{J}/\text{cm}^2$),相对应的饱和功率密度为 $7\ \text{mW}/\text{cm}^2$,且 V:YAG 具有较高的损伤阈值,光化学性质稳定,在 $1.34\ \mu\text{m}$ 处的剩余吸收低^[15-16],因此 V:YAG 是被普遍运用在 $1.34\ \mu\text{m}$ 波段的优良饱和吸收体。由于 V:YAG 激发态吸收的弛豫时间为亚纳秒级,当腔内光子强度足够大时,V:YAG 可通过激发态吸收实现锁模输出,因此 V:YAG 上必须有足够的光子强度^[10]。目前,在不同的激光晶体中均已实现了基于 V:YAG 的调 Q 锁模激光输出,包括 Nd:YVO₄、Nd:GdVO₄、Nd:YAG、Nd:YAP 等晶体^[9-11,17-20]。在这些晶体中,Nd:GdVO₄ 具有较大的吸收截面、发射截面和热导率,更能有效实现高功率激光输出和获得足够的腔内光子强度,使 V:YAG 通过激发态吸收实现锁模输出,因而 Nd:GdVO₄ 更适用于 $1.34\ \mu\text{m}$ 锁模激光器。现已有相关文献报道了 $1.34\ \mu\text{m}$ Nd:GdVO₄/V:YAG 调 Q 锁模激光器^[10-11]。2008 年,Yang 等^[10]采用 Z 型腔获得了 $1.34\ \mu\text{m}$ Nd:GdVO₄ 调 Q 锁模激光器,该激光器的重复频率为 125 MHz,最大输出功率为 220 mW,调 Q 包络脉冲能量为 $10.5\ \mu\text{J}$;2009 年,Li 等^[11]使用 Nd:GdVO₄ 晶体实现了重复频率为 200 MHz 的 $1.34\ \mu\text{m}$ 调 Q 锁模激光器,该激光器的最大输出功率为 200 mW,调 Q 包络脉冲能量为 $5.7\ \mu\text{J}$ 。关于 $1.34\ \mu\text{m}$ Nd:GdVO₄ 调 Q 锁模激光器的研究主要集中在低重复频率区域,而吉赫兹(GHz)锁模激光器在高速电光取样、通信和光学时钟等领域已被广泛应用,因此高重复频率激光器已成为国际上重要的研究方向^[12-17]。

本文利用紧凑线性腔,实验探究了激光晶体在腔内的最优位置,并对其进行了理论分析,最终获得了锁模重复频率高达 2 GHz 的 $1.34\ \mu\text{m}$ 调 Q 锁模激光输出。结合腔型设计,并通过选择具有适当初始透过率的 V:YAG,实现了调制深度接近 100% 的调 Q 锁模脉冲。实验中调 Q 锁模输出功率可达 715 mW,对应调 Q 包络脉冲能量为 $31.08\ \mu\text{J}$,该实验设计得到了更加小型化的激光腔,同时获得了更好的激光性能。实验中随着抽运功率从 7.5 W 增加到 12 W,调 Q 包络的重复频率从 6.8 kHz 增加到 23 kHz,调 Q 包络的宽度从 23.5 ns 减小到 18 ns。利用运用双曲正割平方函数建立的锁模脉冲理论,对单个调 Q 锁模脉冲进行模拟分析,所得模拟结果与实验结果一致。

2 实验装置及结果

Nd:GdVO₄/V:YAG 调 Q 锁模激光器的实验装置如图 1 所示。抽运源为 808 nm 光纤耦合半导体激光器,光纤芯径为 0.2 mm,数值孔径为 0.22。808 nm 抽运源通过耦合效率为 93% 的准直耦合系统聚焦在晶体上,得到的光斑直径约为 $400\ \mu\text{m}$ 。为了抑制 $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ 的振荡和增强 $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ 的振荡,实验中采用对 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长的光高透的输入镜和输出镜。输入镜 M₁ 的曲率半径为 100 mm,镀制 808 nm 高透膜(透过率大于 99.5%)、1063 nm 增透膜(反射率小于 0.5%)和 $1.34\ \mu\text{m}$ 高反膜(反射率大于 99.8%)。激光晶体为 a 向切割 Nd:GdVO₄ 晶体,Nd 离子掺杂质量分数为 0.2%,Nd:GdVO₄ 晶体的尺寸为 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm} \times 12\ \text{mm}$ 。Nd:GdVO₄ 晶体两端面均镀制对 $1.34\ \mu\text{m}$ 和 808 nm 波长的光增透的膜(透过率大于 99.8%)。Nd:GdVO₄ 晶体被铝箔包裹后放入紫铜晶体座内,制冷方式为水冷。水冷系统温度控制在 $18\ ^\circ\text{C}$,以减小激光晶体的热负荷。输出镜 M₂ 为镀制 1063 nm 增透膜(透过率大于 90%)并对 $1.34\ \mu\text{m}$ 波长的光的透过率为 10% 的平平镜。饱和吸收体 V:YAG 的透过率为 83%,两端面镀制 $1.34\ \mu\text{m}$ 增透膜,将饱和吸收体 V:YAG 尽量靠近输出镜放置以使晶体上的光子强度足够强。实验中采用带宽为 5 GHz 的砷化镓(InGaAs)高速探测器以及带宽为 3 GHz 的 LeCroy 公司的 Warepro7300A 示波器探测光信号并记录波形,光谱仪(型号 Andor SR-500I,公司 Andor Technology,英国)用于测量 $1.34\ \mu\text{m}$ 的光谱。

激光器总腔长约为 59 mm。首先设计实验研究了激光晶体在腔内的最优位置。根据 ABCD 矩阵理论,考虑到激光晶体热透镜效应的影响,探究了抽运功率为 12 W 时激光晶体在腔内不同位置所对应的调 Q 锁模激光平均输出功率和晶体光斑大小比的变化,所得结果如图 2 所示。在实验过程中,通过调整抽运光耦合系统,可使抽运光与基频光的光斑模式相匹配。实验结果表明,随着输入镜 M₁ 和 Nd:GdVO₄ 距离的减小,

图1 Nd:GdVO₄/V:YAG 调Q 锁模激光器结构示意图Fig. 1 Structural diagram of Nd:GdVO₄/V:YAG Q-switched mode-locked laser

晶体光斑比逐渐增大,从而有助于获得更高的调Q 锁模平均输出功率。Yang 等^[10,18]提出了一个实现调Q 锁模的条件公式:

$$\frac{\sigma_{gs} A_G}{\sigma A_S} > \frac{1}{2q_0}, \quad (1)$$

式中 σ 为激光晶体的受激发射截面, σ_{gs} 为可饱和吸收体的基态吸收截面, A_G 、 A_S 分别为增益介质和可饱和吸收体上的模面积, q_0 为可饱和吸收体的小信号损耗。

(1)式表明较大的光斑比有助于实现高质量的调Q 锁模^[9],高质量的调Q 锁模有利于实现较高的输出功率,该结论与实验结果相符。根据以上实验探究结果,将 M_1 与Nd:GdVO₄晶体抽运端面之间的距离设为5 mm,将 M_2 与Nd:GdVO₄晶体另一端面之间的距离设为42 mm。对应激光晶体模式半径约为203 μm ,V:YAG模式半径约为115 μm 。

接下来,研究腔中Nd:GdVO₄ 1.34 μm 调Q 锁模激光的相关特性。图3为调Q 锁模激光器的平均输出功率随抽运功率的变化,对应的斜效率接近12.38%。实验结果表明:Nd:GdVO₄/V:YAG 调Q 锁模抽运功率阈值为7.5 W;当抽运功率升至12 W时,调Q 锁模激光脉冲保持稳定,对应最大输出功率为715 mW;当抽运功率继续升高时,调Q 锁模激光脉冲开始波动;当抽运功率超过13 W时,由于热效应的影响,输出功率开始下降。调Q 包络重复频率和宽度随抽运功率的变化曲线如图4所示。由图可见,当抽运功率从7.5 W升至12 W时,调Q 包络的重复频率从6.8 kHz增加至23 kHz,脉冲宽度从23.5 ns减小至18 ns。

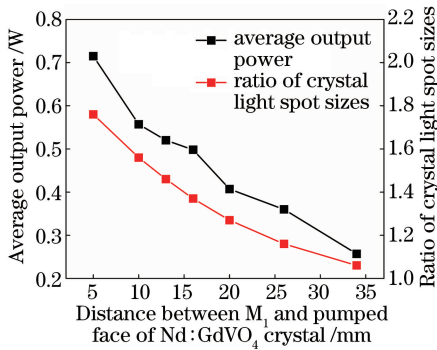


图2 激光晶体在59 mm腔内不同位置所对应的调Q 锁模激光平均输出功率和晶体光斑大小比的变化

Fig. 2 Variations in average output power of Q-switched mode-locked laser and ratio of crystal light spot sizes in laser crystal with cavity length of 59 mm

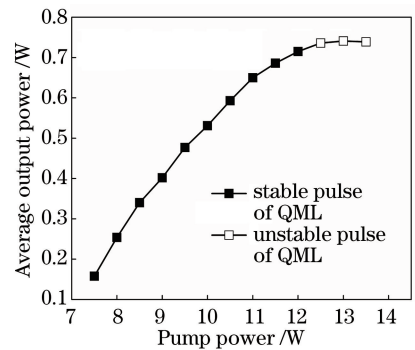


图3 调Q 锁模激光器的平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 3 Variation in average output power of Q-switched mode-locked laser with pump power

根据平均输出功率和重复频率对调Q 包络的单脉冲能量进行估算,得到调Q 包络单脉冲能量随抽运功率的变化如图5所示。由图5可见,抽运功率为12 W时,调Q 包络最大单脉冲能量为31.08 μJ ,远高于现有文献所报道的实验结果^[9-11]。

图6为抽运功率为12 W、重复频率为23 kHz时的典型调Q 锁模包络序列。图7为脉冲宽度为18 ns的单个调Q 锁模脉冲的时域包络。由于光斑比较大,调制深度接近100%。图8为示波器放大后的包络内锁模脉冲序列,时间间隔为500 ps,与光子在腔内的往返时间相符,锁模脉冲的重复频率高达2 GHz。

图8为示波器放大后的包络内锁模脉冲序列,脉宽为211 ps,实验中探测器的上升时间为70 ps,示波器

的上升时间为 117 ps。公式 $\tau = \sqrt{\tau_0^2 + \tau_1^2 + \tau_2^2}$ 描述了测量脉冲宽度 τ 、真实脉冲宽度 τ_0 、探测器的上升时间 τ_1 及示波器的上升时间 τ_2 之间的关系, 示波器的带宽 B_w 为 3 GHz, 带宽与上升时间 τ_2 之间的关系满足 $\tau_2 \times B_w = 0.35$ 。从上述公式可得, 锁模脉冲的脉冲宽度约为 161 ps, 实际脉冲宽度应小于估算的脉冲宽度 (161 ps)。1.34 μm 处的光谱图如图 9 所示。

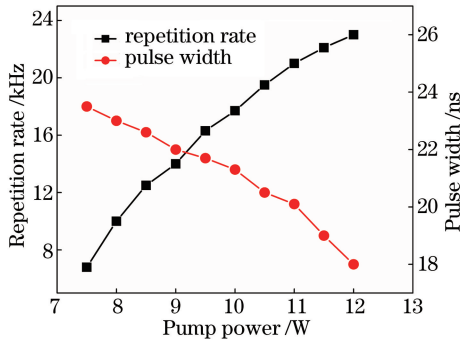


图 4 调 Q 包络重复频率和脉冲宽度随抽运功率的变化
Fig. 4 Variations in repetition rate and pulse width of Q-switched envelope with pump power

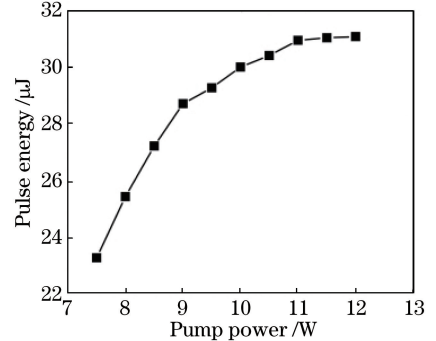


图 5 调 Q 包络单脉冲能量随抽运功率的变化
Fig. 5 Variation in single pulse energy of Q-switched envelope with pump power

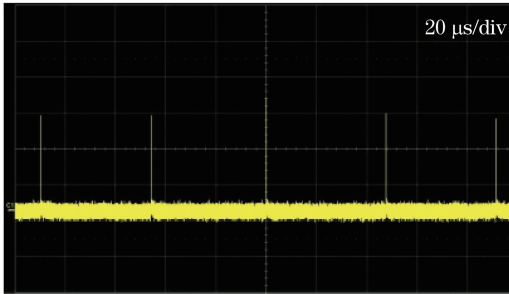


图 6 抽运功率 12 W、重复频率为 23 kHz 时的典型调 Q 锁模包络序列

Fig. 6 Typical Q-switched mode-locked envelope sequence when pump power is 12 W and repetition rate is 23 kHz

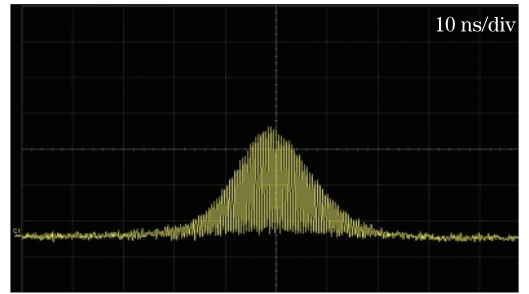


图 7 脉冲宽度为 18 ns 的单个调 Q 锁模脉冲的时域包络

Fig. 7 Temporal envelope of single Q-switched mode-locked pulse when pulse width is 18 ns

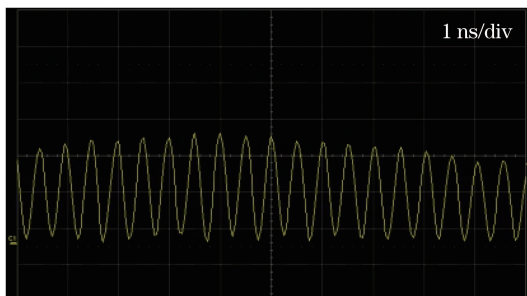


图 8 示波器放大后的包络内锁模脉冲序列
Fig. 8 Mode-locked pulse sequence inside envelope amplified by oscilloscope

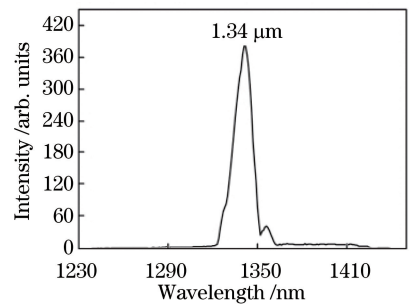


图 9 1.34 μm 处的光谱图
Fig. 9 Spectrum at 1.34 μm

3 理论分析

根据波动机制理论, 输出功率可以表示为^[19]

$$P(t) = \frac{h\nu A c}{2} \ln \frac{1}{R} \sum_{m=0}^{\infty} \Phi_m f(t - t_m), \quad (2)$$

式中 $h\nu$ 为光子能量; c 为真空中光速; A 为增益介质的有效面积; R 为输出镜的反射率; $t_m = mt_r$, 其中 t_r 为

光子在腔内的往返时间; $f(t)$ 为源于噪声的锁模脉冲, $f(t) = 1/(2c\sigma\tau_p) \operatorname{sech}^2(t/\tau_p)^{[20]}$, 其中 τ_p 可由 $\tau = 1.76\tau_p$ 得出, τ 为锁模脉宽。输出功率可表示为^[21]

$$P(t) = \frac{h\nu A}{4\sigma\tau_p} \ln \frac{1}{R} \times \sum_{m=0}^{\infty} \Phi_m \operatorname{sech}^2\left(\frac{t-t_m}{\tau_p}\right), \quad (3)$$

式中 Φ_m 为锁模脉冲第 m 次往返的相对振幅, Φ_m 的递推公式为^[19]

$$\Phi_m = \Phi_{m-1} \exp\left\{\left[\prod_{k=0}^{m-1} \exp(-\gamma\Phi_k) - 1\right] \left(\ln \frac{1}{R} + L\right) + \left\{\prod_{k=0}^{m-1} \exp(-\gamma\Phi_k) - \left\{\beta + (1-\beta) \left[\prod_{k=0}^{m-1} \exp(-\gamma\Phi_k)\right]^a\right\}\right\} \ln T_0^{-2}\right\}, \quad (4)$$

式中 γ 为反转因子(对于四能级系统, $\gamma=1$; 对于三能级系统, $\gamma=2$); L 为不饱和腔内往返耗散光损失; $\beta = \sigma_{es}/\sigma_{gs}$, σ_{es} 为可饱和吸收体激发态吸收截面; T_0 为可饱和吸收体的初始透过率, 给定初始值 Φ_0 , 便能由(4)式得出 Φ_m 。

由(3)式及 Nd:GdVO₄/V:YAG 调 Q 锁模激光器的具体参数: $\sigma = 1.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ^[22], $\sigma_{gs} = 7.2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ ^[23], $\beta = 0.103$ ^[24], $\gamma = 1$, $A = 0.129 \text{ mm}^2$, $A/A_s = 3.12$, $L = 0.01$, $R = 0.9$, $T_0 = 0.83$, $\Phi_0 = 10^{-3}$, 可得出抽运功率为 12 W 下锁模脉冲的理论波形图, 如图 10 所示。由图 10 可见, 调 Q 包络宽度为 15 ns, 锁模脉冲调制深度接近 100%, 与图 7 所示的脉冲宽度为 18 ns 的实验结果基本一致。

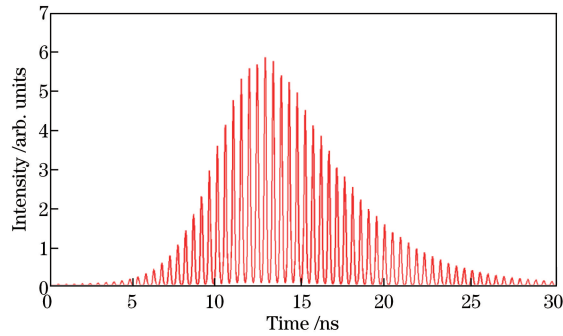


图 10 抽运功率为 12 W 时锁模脉冲的理论波形图

Fig. 10 Theoretical waveform of mode-locked pulse when pump power is 12 W

4 结 论

通过实验探究了激光晶体在腔内不同位置处所对应的调 Q 锁模输出功率和晶体光斑比的变化, 优化了腔结构设计, 并合理地选择 V:YAG 初始透过率, 运用紧凑线性腔得到了调制深度接近 100% 的 1.34 μm Nd:GdVO₄ 调 Q 锁模激光。当抽运功率为 12 W、锁模激光输出功率为 715 mW 时, 对应调 Q 包络脉冲能量为 31.08 μJ , 锁模脉冲的重复频率高达 2 GHz。理论模拟了单个调 Q 包络下锁模脉冲序列, 模拟结果与实验结果相符。下一步将对基于 V:YAG 的 1.5 μm 自拉曼调 Q 锁模激光器进行研究。

参 考 文 献

- [1] Whitley T J. A review of recent system demonstrations incorporating 1.3 μm praseodymium-doped fluoride fiber amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(5): 744-760.
 - [2] Boquillon J P, Musset O, Guillet H, *et al.* High efficiency flashlamp-pumped lasers at 1.3 μm with Nd-doped crystals: Scientific and medical applications[C]. IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics, 1999: 6504591.
 - [3] Zhang G, Zhao S Z, Li Y F, *et al.* A dual-loss-modulated Q-switched and mode-locked Nd:GdVO₄ laser with AOM and V³⁺:YAG saturable absorber at 1.34 μm [J]. Journal of Optics, 2011, 13(3): 035202.
 - [4] Ma Yi, Wang Weimin, Pang Yu, *et al.* Design analysis on 1319 nm Nd:YAG three-longitudinal-mode pulse laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(S1): 151-154.
- 马毅, 王卫民, 庞毓, 等. Nd:YAG 1319 nm 三纵模脉冲激光器设计分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(S1):

- 151-154.
- [5] Wei Yong, Zhang Ge, Huang Chenghui, *et al.* Output of 1319 nm and 1338 nm dual wavelength Nd:YAG pulse laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 45-48.
魏勇, 张戈, 黄呈辉, 等. 1319 和 1338nm 双波长 Nd:YAG 脉冲激光输出实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 45-48.
- [6] Chen Y F. Compact efficient all-solid-state eye-safe laser with self-frequency Raman conversion in a Nd:YVO₄ crystal [J]. Optics Letters, 2004, 29(18): 2172-2174.
- [7] Kaminskii A A, Ueda K, Eichler H J, *et al.* Tetragonal vanadates YVO₄ and GdVO₄-new efficient $\chi^{(3)}$ -materials for Raman lasers[J]. Optics Communications, 2001, 194(1): 201-206.
- [8] Ma J, Xu Y, Zhao P, *et al.* A laser-diode end-pumped passively Q-switched intracavity doubling Nd:GdVO₄/KTP red laser with V³⁺:YAG saturable absorber[J]. Laser Physics, 2010, 20(8): 1703-1706.
- [9] Agnesi A, Guandalini A, Reali G, *et al.* Diode pumped Nd:YVO₄ laser at 1.34 μm Q-switched and mode locked by a V³⁺:YAG saturable absorber[J]. Optics Communications, 2001, 194(4): 429-433.
- [10] Yang K J, Zhao S Z, He J L, *et al.* Diode-pumped passively Q-switched and mode-locked Nd:GdVO₄ laser at 1.34 μm with V:YAG saturable absorber[J]. Optics Express, 2008, 16(25): 20176-20185.
- [11] Li M, Zhao S, Yang K, *et al.* LD-pumped 1.34 μm -Q-switched and mode-locked Nd:GdVO₄ laser by a V³⁺:YAG saturable absorber[J]. Laser Physics, 2009, 19(5): 933-938.
- [12] Yang J F, Yang X Q, He J L, *et al.* Diode-pumped passively Q-switched mode-locking Nd:Y_{0.5}Gd_{0.5}VO₄ laser at 1.34 μm with Co²⁺:LaMgAl₁₁O₁₉ saturable absorber[J]. Laser Physics, 2009, 19(8): 1819-1823.
- [13] Ge W W, Zhang H J, Wang J Y, *et al.* Pulsed laser output of LD-end-pumped 1.34 μm Nd:GdVO₄ laser with Co:LaMgAl₁₁O₁₉ crystal as saturable absorber[J]. Optics Express, 2005, 13(10): 3883-3889.
- [14] Huang H T, He J L, Zuo C H, *et al.* Co²⁺:LMA crystal as saturable absorber for a diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO₄ laser at 1342 nm[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2007, 89(2): 319-321.
- [15] Malyarevich A M, Denisov I A, Yumashev K V, *et al.* V:YAG-a new passive Q-switch for diode-pumped solid-state lasers[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 1998, 67(5): 555-558.
- [16] Agnesi A, Dell'Acqua S, Piccinini E, *et al.* High power diode-pumped Nd: host lasers passively Q-switched at 1.3 μm [C]. IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2000: 6924183.
- [17] Jabczyn J K, Kopczyn K, Mierczyk Z, *et al.* Application of V³⁺:YAG crystals for Q-switching and mode-locking of 1.3- μm diode-pumped neodymium lasers[J]. Optical Engineering, 2001, 40(12): 2802-2811.
- [18] Jelinkova H, Cerny P, Sulc J, *et al.* Nd:YAP 1.34- μm /1.08- μm laser passively mode-locked and Q-switched by V³⁺:YAG/BDN II saturable absorbers with efficient radiation delivery through a hollow glass waveguide coated with COP/Ag[J]. Optical Engineering, 2002, 41(8): 1976-1982.
- [19] Jelinkova H, Sulc J, Nemeč M, *et al.* Passively mode-locked Nd:YAP 1340-nm laser with V:YAG saturable absorber [C]. SPIE, 2004, 5610: 292-296.
- [20] Sulc J, Jelinkova H, Nemeč M, *et al.* V:YAG saturable absorber for flash-lamp and diode-pumped solid state lasers [C]. SPIE, 2004, 5460: 292-302.
- [21] Li Pan, Shi Lei, Wang Xuefeng, *et al.* Experimental investigation of the supercontinuum generated by amplified high repetition mode-locked pulses[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s214006.
李磐, 时雷, 王学锋, 等. 基于高重复频率锁模脉冲放大产生超连续谱的实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s214006.
- [22] Bartels A, Dekorsy T, Kurz H. Femtosecond Ti: sapphire ring laser with a 2-GHz repetition rate and its application in time-resolved spectroscopy[J]. Optics Letters, 1999, 24(14): 996-998.
- [23] Jiang W H, Yatsui K, Takayama K, *et al.* Compact solid-state switched pulsed power and its applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(7): 1180-1196.
- [24] Liu Jinghui, Tian Jinrong, Hu Mengting, *et al.* Burgeoning developments in high repetition rate mode locked solid-state laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 120001.
刘京徽, 田金荣, 胡梦婷, 等. 蓬勃发展的高重复频率固体锁模激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 120001.

- [25] Huang Yutao, Wang Lulu, Shi Zhaohui, *et al.* High-power and high repetition-rate picosecond laser with no damage in SESAM[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802010.
黄玉涛, 王璐璐, 石朝辉, 等. SESAM 无损伤运转的大功率高重复频率皮秒激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802010.
- [26] Yu Haibo, Liu Ke, Chen Ying, *et al.* Design of a compact passively air cooled picosecond Nd:YVO₄ oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802009.
于海波, 刘可, 陈莹, 等. 紧凑型被动风冷 Nd:YVO₄皮秒振荡器设计[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802009.
- [27] Kaertner F X, Brovelli L R, Kopf D, *et al.* Control of solid state laser dynamics by semiconductor devices[J]. Optical Engineering, 1995, 34(7): 2024-2036.
- [28] Chen Y F, Lee J L, Hsieh H D, *et al.* Analysis of passively Q-switched lasers with simultaneous mode locking[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(3): 312-317.
- [29] Li M, Zhao S, Li G, *et al.* Analysis of a laser-diode end-pumped intracavity frequency-doubled passively Q-switched and mode-locked Nd:GdVO₄/KTP laser[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2006, 8(11): 1007-1012.
- [30] Liu J, Wang C H, Liu S H, *et al.* Characterization of passively Q-switched mode-locking diode-pumped Nd: GdVO₄ laser with Cr⁴⁺:YAG saturable absorber[J]. Journal of Modern Optics, 2008, 55(12): 1971-1980.
- [31] Jensen T, Ostroumov V G, Meyn J P, *et al.* Spectroscopic characterization and laser performance of diode-laser-pumped Nd:GdVO₄[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 1994, 58(5): 373-379.