

LD 泵浦钇镜共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 微型激光器实验研究

张宇露, 惠勇凌, 姜梦华, 雷 訇, 李 强

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要: 1.5 μm LD 泵浦钇镜玻璃被动调 Q 微型激光器是目前军事激光测距的研究热门, 获得较高的激光单脉冲能量尤为重要。对以波长为 940 nm 的二极管激光器作为泵浦源, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃作为增益介质, $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 作为调 Q 晶体的微型化激光器进行了实验研究。为获得 LD 抽运钇镜共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 微型激光器的最佳能量输出条件, 分析了影响 LD 泵浦被动调 Q 激光器输出单脉冲能量的因素, 并对影响被动调 Q 微型激光器输出能量的泵浦条件, 增益介质长度, 输出镜反射率等参数进行了多组实验优化, 最终获得了波长 1.535 μm , 单脉冲能量 113 μJ , 脉宽 6 ns, 重复频率 10 Hz, 光束质量为 1.2 的稳定人眼安全激光输出。

关键词: 被动调 Q; 钇镜共掺磷酸盐玻璃; 实验研究

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0305004

Experimental study of LD-pumped erbium ytterbium co-doped phosphate glass passively Q-switched microlaser

Zhang Yulu, Hui Yongling, Jiang Menghua, Lei Hong, Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: 1.5 μm LD pumped erbium ytterbium co-doped phosphate glass passively Q-switched microlaser was currently laser ranging military hotspots, and to achieve high laser pulse energy was particularly important. Experimental study of miniaturized laser was using of 940 nm diode laser as the pump source, $\text{Er}^{3+} / \text{Yb}^{3+}$ co-doped phosphate glass as the gain medium, $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ as a Q-switched laser crystal miniaturization. In order to obtain LD-pumped erbium ytterbium co-doped phosphate glass microlaser passively Q the best energy output condition, factors of the LD-pumped erbium ytterbium co-doped phosphate glass passively Q-switched laser output pulse energy were analyzed. A lot of experiments were done on pump laser output power conditions, the length of the gain medium, the output mirror transmission and other parameter. Eventually stable laser output was obtained with wavelength of 1.535 μm , single pulse energy of 13 μJ , pulse of 6 ns, repetition rate of 10 Hz, beam quality of 1.2.

Key words: passively Q-switched; erbium ytterbium co-doped phosphate glass; experimental study

收稿日期: 2016-07-05; 修订日期: 2016-08-10

基金项目: 北京市科技专项(Z131104002813107)

作者简介: 张宇露(1989-), 女, 硕士生, 主要从事固体激光器方面的研究。Email: zhangyloptics@126.com

导师简介: 李强(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事固体激光技术及加工系统方面的研究。Email: ncltlq@bjut.edu.cn

0 引言

1.5 μm 波长的激光由于其其在测距、光通讯等领域的广泛应用而备受关注^[1-2]。这是由于 1.5 μm 波长处于人眼不敏感的波段, 对人眼的允许曝光是 1 064 nm Nd:YAG 激光的 40 万倍, 是 10.6 μm CO_2 激光的 100 倍^[3]; 其次, 1.5 μm 激光处于大气第三个传输窗口, 对烟、雾的穿透能力强, 在军事测距中的意义十分重大^[4-5]。

目前输出 1.5 μm 波长人眼安全激光的技术方法有三种: 光学参量振荡 (Optical Parametric Oscillator, OPO), 受激拉曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS) 和直接输出。OPO 和 SRS 通常是将 1.06 μm 的激光经过转换频率来获得, 这样导致系统结构复杂, 不利于单兵作战和军事上利用, 而且成本也比较高, 不利于大量生产。直接输出 1.5 μm 激光是实现大数量生产、微型化、大量应用最为理想的方法。直接输出 1.5 μm 激光包括两种方式, 一种是直接生产的半导体激光二极管, 一种是通过二极管泵浦增益来获得。激光二极管光束质量较差, 半导体材料易受温度影响, 稳定性不高。其中 LD 泵浦钕玻璃是最常见获得 1.5 μm 人眼安全激光的方式。这是由于钕共掺磷酸盐玻璃具有长的上能级寿命、高的钕能量转移效率和不易产生荧光淬灭等特点^[6], 且生产条件成熟, 是目前低重频直接输出 1.5 μm 人眼安全激光最常使用的增益介质。

LD 泵浦钕共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 激光器国外发展较早。2000 年, 瑞典皇家理工学院 G. Karlsson 等利用 980 nm LD 泵浦 Er, Yb:glass 和 Co^{2+} :MALO 被动调 Q 晶体实现了峰值功率 2 kW, 脉宽 2.3 ns 的脉冲激光输出。2004 年, 美国 Kigre 公司 Scott J. Hamlin 等人用 940 nm LD 泵浦 Er, Yb:glass 和 Co^{2+} :MALO 被动调 Q 晶体实现了单脉冲能量 100 μJ , 脉宽 2 ns, 重频 20 Hz, 1.5 μm 波长脉冲激光输出。2012 年, 白俄罗斯 V.E. Kisel 通过 980 nm LD 抽运 Er, Yb:YAl₃(BO₃)₄ 和 Co^{2+} :MALO 晶体, 实现了重频 60 kHz, 单脉冲能量 5.25 μJ , 脉宽 5 ns 的激光输出^[6]。国内研究较晚, 2006 年南开大学吴朝晖^[7]采用 980 nm LD 抽运 Er, Yb:glass, 被动调 Q 晶体为 Co^{2+} :MALO, 实现了峰值功率为 2 kW, 脉宽为 7.4 ns 的激

光输出。2011 年福州物质结构研究所姜大鹏等^[8]采用 980 nm LD 泵浦, 被动调 Q 晶体为 Co^{2+} : $\text{Mg}_{0.4}\text{Al}_{2.4}\text{O}_4$, 输出单脉冲能量 4.5 μJ , 脉宽 2.3 ns。目前国内研究的此类型激光器输出单脉冲能量较低, 体积较大, 无法满足国内军事上中短距离激光测距的相关应用。国外相关产品又禁销国内, 所以研究较大能量 LD 抽运钕共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 微型激光器很有意义。

1.5 μm 被动调 Q 的调 Q 元件有较为广泛使用的半导体饱和吸收镜, 以及目前文献中可查的有掺钕离子, 铀离子, 钴离子等的晶体。目前海内外获得该波长的被动调 Q 钕玻璃激光器采用的被动调 Q 晶体多为 Co^{2+} : MgAl_2O_4 晶体, 目前人们已经用该晶体获得了脉冲宽度 7.5 ns, 峰值功率 2 kW 以上的微型化调 Q 激光脉冲^[9-11]。尖晶石晶体中的 Co^{2+} 在 1.5 μm 激光波段左右有很宽的吸收带, 有足够大的吸收截面 (约 $3.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$) 远大于钕玻璃发射截面 $8 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ ^[11], 它还有着充足的激发态寿命 (达 $350 \pm 40 \text{ ns}$)^[12-13] 和很小的激发态吸收损耗, 这些优点使得其成为微型化 1.5 μm 人眼安全激光器的首选调 Q 晶体。

文中实验中选取 940 nm 的二极管作为泵浦源, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃作为增益介质, Co^{2+} : MgAl_2O_4 作为调 Q 晶体。基于 LD 抽运钕共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 激光输出的参数分析, 对影响被动调 Q 激光输出能量的相关参数进行了实验优化。最终实现了输出单脉冲能量达到 113 μJ , 脉宽为 6 ns, 光束质量为 1.2 的 1.5 μm 人眼安全激光输出。

1 实验参数分析

为获得 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 激光器最优化的能量输出, 需要对影响被动调 Q 能量输出的参量进行分析。考虑到激光器中增益介质和可饱和吸收体的跃迁过程和能级激发, 根据调 Q 运转时的速率方程^[14], 可以得出调 Q 运转时输出脉冲能量 E 有^[15]:

$$E = \frac{h\nu A}{4\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \cdot \int_0^{\infty} \Phi(0, t) dt \quad (1)$$

式中: $h\nu$ 表示光子能量; A 为激光束在增益介质里的截面积; σ 为增益介质的受激发射截面; γ 为反转因子; $\Phi(0, t)$ 为归一化光子数密度; R 为输出镜的反射

率,同时引入归一化时间 t 。

光子数密度随归一化时间 t 变化的微分方程如下^[16]:

$$\frac{d\Phi(0,t)}{dt} = \Phi(0,t) \int_0^1 \exp\{-A(t) \cdot y^\beta\} dy - \left(1 - \frac{1}{N}\right) \Phi(0,t) \frac{1 - \exp(-\alpha A(t)) - \frac{\Phi(0,t)}{N}}{\alpha A(t)} \quad (2)$$

其中:

$$y = \exp\left[-2r^2 \left(\frac{1}{\omega_L} + \frac{1}{\omega_p}\right)\right]$$

$$\beta = \frac{1}{1 + (\omega_L/\omega_p)^2}$$

$$A(t) = \int_0^t \Phi(0,t) dt$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{13} S_g}{\gamma \sigma S_s}$$

$$N = \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \ln\left(\frac{1}{T_0}\right) + L}{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \left(\frac{\sigma_{21}}{\sigma_{13}}\right) \ln\left(\frac{1}{T_0}\right) + L}$$

式中: ω_L, ω_p 分别代表激光增益中的激光束光斑半径和泵浦光的光斑半径; S_g, S_s 分别为激光光束在增益介质中和调 Q 晶体中的光斑半径; σ_{21}, σ_{13} 分别为激发态的吸收截面和饱和吸收体基态吸收截面; T_0 为调 Q 开关的小信号透过率。

公式(2)中, $\Phi(0,t)$ 与增益介质中的泵浦光斑半径、调 Q 晶体初始透过率等参数有关; 公式(1)中, 输出脉冲能量 E 包含 $\Phi(0,t)$ 参数的影响, 且与增益介质及激光束光斑半径、激光器输出镜的反射率等参数有关。因此被动调 Q 激光器的单脉冲能量输出由泵浦条件、增益介质、调 Q 晶体以及激光谐振腔的腔参数来共同决定。

由于被动调 Q 能量输出由多个参数共同确定, 只选取单一参数最佳, 难以获得激光被动调 Q 最优化的能量输出。例如为了获得较高的反转粒子数密度可以通过提高磷酸盐玻璃中 Er^{3+} 掺杂浓度来实现。然而随着 Er^{3+} 掺杂浓度的提高, 由于其在 $1.5 \mu\text{m}$ 的再吸收, 会急剧提高腔内的损耗, 这样调 Q 输出需要更多的腔内累积更多的反转粒子数, 因此影响了被动调 Q 激光能量的输出。并且上能级粒子除了受激辐射回基态发出 $1.5 \mu\text{m}$ 人眼安全激光以外, 还会进一步激发到更高的能级上, 这是由于上能级粒

子通过累积能量转移和共协上转换而被激发^[7,15]。上述两种现象会减小腔内上能级粒子数密度, 而且被共协上转换及累积能量转移吸收的泵浦光能量^[16], 通过高能级的多光子无辐射弛豫到激光上能级, 使得激光增益介质的热沉积不断增加。这不仅仅会带来严重的热透镜效应, 而且会影响激光的输出效率^[17]。所以, 为了获得被动调 Q 最优化的能量输出, 不能取泵浦条件、增益介质、饱和吸收体和谐振腔的参量中的单一最佳变量, 需要通过大量的实验优化, 最终获得最优化被动调 Q 输出条件。

2 实验研究及分析

2.1 实验装置

LD 抽运钇镱共掺磷酸盐玻璃被动调 Q 激光器由 LD 泵浦源、聚焦镜、 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃、 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶体和输出腔镜组成, 实验装置如图 1 所示。其中泵浦源采用 TO-3 封装的二极管激光器, 该激光二极管的中心波长为 940 nm , 通过电源控制使其重频为 10 Hz , 相比于 980 nm , Yb^{3+} 在 940 nm 左右的吸收截面随波长变化很小^[2], 因此当外界温度发生变化而带来的泵浦波长的温漂时, 增益介质对泵浦光的吸收变化不大, 所以激光的输出会保证在一个较为稳定的状态, 更有利于在外界多变环境中使用。钇玻璃前端面镀 940 nm 高透膜和 1535 nm 高反膜, 调 Q 晶体前后端面镀 1535 nm 增透膜, 这是为了减小非涅尔损耗, 激光器腔型选择平平行腔。

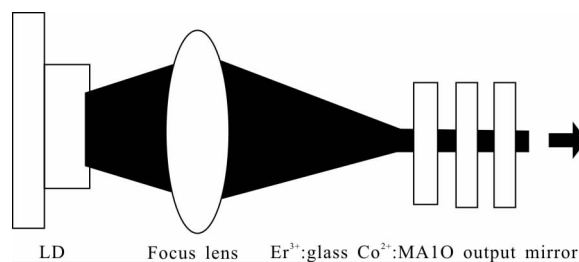


图 1 激光器实验装置图

Fig.1 Experiment device of laser

2.2 实验设计及结果分析

如上文所述, 磷酸盐玻璃的再吸收和上转换效应会严重影响激光输出的单脉冲能量。因此为了减小此不利因素, 实验采用掺杂浓度为 $1 \text{ wt.}\% \text{Er}^{3+}$, $21 \text{ wt.}\% \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃作为增益介质, 增益介

质长度最佳长度为 2~4 mm 之间。由上文参数分析可知, 被动调 Q 最优化的能量输出由泵浦条件、增益介质、饱和吸收体和谐振腔的参量共同确定。所以文中在增益介质掺杂浓度和调 Q 晶体初始透过率选定的条件下, 研究实验取聚焦镜焦距 f , 增益介质长度 l , 输出镜反射率 R 为三个实验变量。文中的实验研究中聚焦镜焦距分别为 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 mm, 磷酸盐玻璃长度分别为 2.5, 2.7, 3.0, 3.2, 3.5, 4.0 mm, 输出镜反射率分别为 90%, 85%, 80%, 75%, 70%。实验中可饱和吸收体(调 Q 晶体)的初始透过率为 70%。

实验中发现, 调 Q 激光输出在阈值附近时产生单一的脉冲, 而随着泵浦功率的增加, 激光输出由单一脉冲衍生为多个脉冲。实验研究中激光泵浦源重复频率为 10 Hz, 即周期为 100 ms, 图 2 所示高泵浦功率下示波器抓取的激光脉冲, 在激光第一个脉冲之后约 1 ms 产生了低于首个脉冲能量的新脉冲。在实际测距应用中, 产生测距作用的是激光输出的单脉冲能量或者脉冲序列首个脉冲信号^[18]。所以在文中的实验研究中通过能量计来测量首个脉冲的能量, 作为该实验条件下激光输出的单脉冲能量大小。

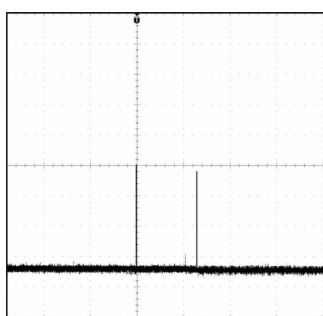


图 2 高泵浦功率时激光脉冲串
Fig.2 Laser pulse trains of high pump power

2.2.1 泵浦条件的影响

随着聚焦镜焦距的变化, 泵浦光功率密度, 以及泵浦光焦深, 包括激光光束的半径和泵浦光的半径都会发生变化。通过实验测量可得, 焦距较短时, 泵浦光斑半径较小, 泵浦光功率密度高, 但焦深短, 焦距较长时则反之。图 3 所示为增益介质长度 $l=3$ mm 时, 输出镜反射率 $R=85%$, 75% 时, 不同焦距与输出单脉冲能量的关系, 此时最佳能量输出为聚焦镜 $f=3.5$ mm 时候, 此时的输出镜透射率位 15%, 反射率 $R=85%$ 。由图 3 可以看出, 聚焦镜的焦距有最佳值,

而且输出镜通过率不同时最佳焦距在发生变化。这是由于焦距较长时泵浦功率密度较低、光斑半径大导致泵浦阈值提高, 不利于激光输出, 但长的焦距减小了再吸收的影响以及具备较长的焦深更有利于激光输出, 焦距较短则反之。

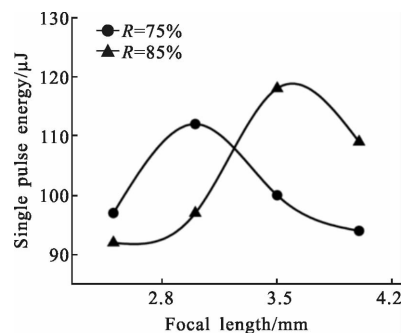


图 3 不同焦距与激光输出单脉冲能量的关系

Fig.3 Laser output single pulse energy with different focal lengths

2.2.2 增益介质长度的影响

由文中可知磷酸盐玻璃长度也是影响单脉冲能量输出大小的重要因素。图 4 所示为焦距 $f=4.0$, 3.5, 3.0, 2.5 mm, 输出镜反射率 $R=85%$ 时, 不同长度磷酸盐玻璃与激光输出单脉冲能量的关系, 此时最佳能量输出为聚焦镜 $f=4.0$ mm, 铒玻璃 $l=2.7$ mm。由图中可以得知, 铒玻璃长度存在一个最佳值, 而且焦距不同时铒玻璃最佳长度是发生偏移的。由于铒玻璃较长时其存在的再吸收和粒子上转换问题, 影响了激光能量的输出, 铒玻璃较短时不能够提供足够的反转粒子也会影响激光能量的输出。

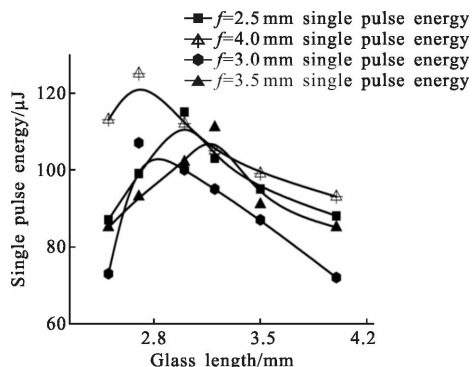


图 4 不同长度铒玻璃与激光输出单脉冲能量的关系

Fig.4 Laser output single pulse energy with different lengths erbium glass

2.2.3 输出镜透过率的影响

由文中可知, 输出镜反射率 R 是影响激光能量

的另一重要因素。图 5 所示为 $f=2.5$ mm, 磷酸盐玻璃 $l=2.5, 2.7, 3.0, 3.2, 3.5, 4.0$ mm, 不同输出镜反射率与激光输出单脉冲能量的关系, 此时最佳能量输出为铒玻璃 $l=3.0$ mm, 输出镜 $R=85%$, 铒玻璃 $l=3.5$ mm, 输出镜 $R=75%$ 。由图 5 中可知输出镜反射率同样存在最佳值, 而且晶体长度不同时, 最佳反射率是不同的。

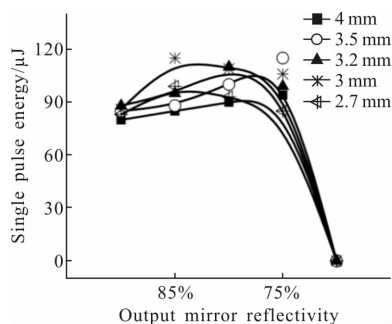


图 5 不同输出镜反射率与激光输出单脉冲能量的关系
Fig.5 Laser output single pulse energy with different output mirror reflectivity

2.2.4 实验结果

从图 3, 4, 5 中的曲线可以看出, 如果铒玻璃长度 l , 聚焦镜焦距 f , 输出镜反射率 R 这三个参数其中的任意一项确定, 都可以在实验中获得相应的最佳能量输出。文中对这三个变量进行了充分的实验优化, 调 Q 晶体初始透过率 $T=70%$, 当铒玻璃长度 $l=2.7$ mm, 聚焦镜焦距 $f=4$ mm, 输出镜反射率 $R=85%$ 时, 获得最佳输出, 输出单脉冲能量 $113 \mu\text{J}$, 激光器光光转换效率为 $1.6%$, 峰值功率大于 20 kW, 重复频率 10 Hz, 通过狭缝法测得激光光束质量 M^2 为 1.2 , 脉宽 6 ns 如图 6 所示。激光输出平均功率随着泵浦光功率的增加呈线性增长, 激光输出稳定如图 7 所示。



图 6 激光输出脉宽
Fig.6 Laser output pulse width

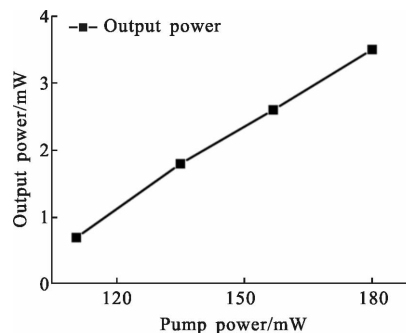


图 7 激光输出平均功率状态
Fig.7 Laser average output power status

3 结论

文中首先进行了常见被动调 Q 激光器单脉冲能量输出的参数分析, 列出影响能量的各个参数。分析得出铒玻璃长度 l , 聚焦镜焦距 f , 输出镜反射率 R 这三个参数以及铒玻璃的再吸收和上转换效应共同影响着激光能量的输出。因此对铒玻璃长度 l , 聚焦镜焦距 f , 输出镜反射率 R 三个参数保证单一变量进行了充分的实验研究, 最终获得了单脉冲能量 $113 \mu\text{J}$, 脉宽 6 ns, 重频为 10 Hz, 光束质量 M^2 为 1.2 的人眼安全 $1.5 \mu\text{m}$ 激光输出。通过文中实验研究可知, 影响被动调 Q 输出能量的参量并不是单一的, 并且它们之间互相关联, 必须通过实验优化才能获得最佳的能量输出, 文中的研究结果对 LD 抽运铒镱共掺磷酸玻璃被动调 Q 激光器参数优化有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Karlsson G, Pasiskevicius V, Laurell F, et al. Diode-pumped Er-Yb:glass laser passively Q switched by use of Co^{2+} : MgAl_2O_4 as a saturable as a absorber [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(33): 6188-6182.
- [2] Song Feng. Luminescence and laser performance of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-doped phosphate glass for $1.54 \mu\text{m}$ emission [J]. *Laser Optoelectronics Progress*, 2007, 44(4): 14-25. (in Chinese)
宋峰. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃的发光与 $1.54 \mu\text{m}$ 激光性能[J]. *激光与光电子进展*, 2007, 44(4): 14-25.
- [3] US FDA laser safety standards [S]. HHS publication FDA (美国 FDA 激光安全标准)86-8262, 1980.
- [4] Song Feng, Chen Xiaobo, Shang Meiru, et al. Erbium-ytterbium-doped glass laser and its applications [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1998, 9(3): 264-267. (in Chinese)
宋峰, 陈晓波, 商美茹, 等. 掺铒玻璃激光器及其应用[J].

- 光电子·激光, 1998, 9(3): 264–267.
- [5] Song Xinxiang, Zhang Xiaoxia, Dong Fengmei, et al. Er³⁺, Yb³⁺ co-doped phosphate glass laser and its applications[J]. *Laser Optoelectronics Progress*, 2004, 41(9): 33–36. (in Chinese)
宋新祥, 张晓霞, 董峰梅, 等. Er³⁺/Yb³⁺共掺磷酸盐激光玻璃及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(9): 33–36.
- [6] Sparious K, Stultz R D, Birnbaum M, et al. Er:GaCa₅(PO₄)₃F saturable absorber Q switch for the Er:glass laser at 1.53 μm [J]. *Applied Physics*, 1993, 62:2763–2765.
- [7] Stultz R D, Camargo M B, Heamann E, et al. U:SrF efficient saturable absorber Q switch for the 1.54 μm erbium:glass laser[J]. *Applied Physics*, 1994, 64: 948–950.
- [8] Karlsson G, Laurell F, Shcherbitsky V G, et al. Passive Q-switching at 1.54 μm of an Er–Yb:GdCa₅O (BO₃)₃ laser with a Co²⁺:MgAl₂O₄ saturable absorber [J]. *Applied Physics B*, 2005, 81: 49–52.
- [9] Yumashev K V. Saturable absorber Co²⁺:MgAl₂O₄ crystal for Q-switching of 1.34 μm Nd³⁺:YAlO₃ and 1.54 μm Er³⁺:glass lasers[J]. *Applied Optics*, 1999, 38: 6343–6346.
- [10] Wu R K, Myera J D, Rapp C. Fluorescence lifetime and 980nm pump energy transfer dynamics in erbium and ytterbium co-doped phosphate laser glasses[C]//SPIE, 2003, 4968: 11–17.
- [11] Wu Zhaohui, Song Feng, Liu Shujing, et al. Theretical analysis and numerical calculation of LD pumped passively Q-switched Er³⁺, Yb³⁺ co-doped phosphate glass lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(9): 4659–4664. (in Chinese)
吴朝晖, 宋峰, 刘淑静, 等. LD抽运Er³⁺, Yb³⁺共掺磷酸盐玻璃被动调Q激光器的理论分析和数值计算 [J]. 物理学报, 2006, 55(9): 4659–4664.
- [12] Wu Zhaohui, Song Feng, Liu Shujing, et al. Influence of upconversion effect on Er³⁺, Yb³⁺ co-doped phosphate glass lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54 (12): 5637–5641. (in Chinese)
吴朝晖, 宋峰, 刘淑静, 等. 上转换对Er³⁺, Yb³⁺共掺磷酸盐玻璃激光器输出的影响 [J]. 物理学报, 2005, 54(12): 5637–5641.
- [13] Blows J L, Omatsu T, Dawes J, et al. Heat generation in Nd:YVO₄ with and without laser action [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, 10(2): 1727–1729.
- [14] Zhang X Y, Zhao S Z, Wang Q P, et al. Optimization of Cr³⁺-doped saturable-absorber Q-switched lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(12):2286–2294.
- [15] Guo Meng, Hui Yongling, Wang Wanyi, et al. Miniature LD pumped Q-switched Er³⁺, Yb³⁺ co-doped phosphate glass laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9): 091001. (in Chinese)
郭猛, 惠勇凌, 王万炜, 等. 微型化LD泵浦Er³⁺, Yb³⁺共掺磷酸盐玻璃被动调Q激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9):091001.
- [16] Wang Li, Xu Antao, Wang Ying, et al. Laser development and laser ranging method [J]. *Journal of Jiaozuo University*, 2007, 4(10): 55–57. (in Chinese)
王丽, 许安涛, 王瑛, 等. 激光器的发展及激光测距方法 [J]. 焦作大学学报, 2007, 4(10): 55–57.
- [17] Kisel V E, Gorbachenya K N, Yasukevich A S, et al. Passively Q-switched microchip Er, Yb:YAl₃ (BO₃)₄ diode-pumped laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2745–2747.
- [18] Jiang D P, Zou Y Q, Su L B, et al. A Co²⁺-doped alumina-rich Co²⁺:Mg_{0.4}Al_{2.4}O₄ spinel crystal as saturable for a LD pumped Er: glass microchip laser at 1 535 nm [J]. *Laser Phys Lett*, 2011, 8(5): 342–348.