

doi:10.3788/gzxb20184702.0214002

Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG 键合晶体调 Q 激光输出特性研究

郭俊宏¹, 段延敏¹, 张静¹, 袁先漳¹, 颜利芬¹, 王鸿雁², 朱海永¹

(1 温州大学 物理与电子信息工程学院, 浙江 温州 325035)

(2 青岛海泰光电技术有限公司, 山东 青岛 266100)

摘 要:对激光二极管端面抽运 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG 键合晶体的 1 064 nm 被动调 Q 激光性能进行了研究,对比分析了 Cr⁴⁺:YAG 晶体初始透过率分别为 84.9% 和 90.6% 的调 Q 激光输出特性,以及不同耦合输出镜透过率对调 Q 性能的影响.结果表明,在特定抽运功率下,各输出特性参数的优化(高输出功率,高重复频率,窄脉冲宽度)分别对应一个最佳的输出镜透过率;随着抽运功率增加,对应最佳的输出镜透过率越大.对比两种初始透过率的 Cr⁴⁺:YAG 晶体对应的激光输出特性,84.9% 初始透过率的晶体获得相对较低的平均输出功率,但相应的重复频率较小,脉冲宽度窄,使得调 Q 激光的峰值功率明显提高.采用 30% 透过率的耦合输出镜和 10.4 W 入射抽运功率下,获得了 3.2 W 平均输出功率、9.7 ns 脉冲宽度和 52 kHz 重复频率的激光输出,经计算可知峰值功率达 6.3 kW.

关键词:被动调 Q;Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG;可饱和吸收体;1 064 nm 激光;LD 端面抽运

中图分类号:TN248

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)02-0214002-6

Investigation on Passively Q-switch Output Characteristics of Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG Composite Crystal Laser

GUO Jun-hong¹, DUAN Yan-min¹, ZHANG Jing¹, YUAN Xian-zhang¹,
YAN Li-fen¹, WANG Hong-yan², ZHU Hai-yong¹

(1 College of Physics and Electronic Information Engineering, School of Wenzhou University,
Wenzhou, Jiangsu 325035, China)

(2 Crystech Inc., Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: The output characteristics of a passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG composite crystal laser at 1 064 nm was studied with diode-end-pumped system. The laser output characteristic parameters were compared among five output couplers with different transmittance, and between two Cr⁴⁺:YAG crystals with initial transmittance of 84.1% and 90.6%. The experiment results show that the output parameters as average output power, pulse repetition frequency and pulse width could be optimized with transmittance of the output coupler. And the optimized transmittance also increased with the pump power. By the comparison of laser output characteristics between two crystals with different initial transmittance, the crystal having initial transmittance of 84.9% produced relatively low average power output, but its low pulse repetition frequency and narrow pulse width made the Q-switched laser peak power improved significantly. Under the incident pump power of 10.4 W, the maximum output

基金项目:国家自然科学基金(No. 61505147),浙江省公益技术应用研究计划项目(Nos. 2015C34017,2017C34008)和温州大学研究生创新基金(No. 3162016030)资助

第一作者:郭俊宏(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为新型固体激光器. Email:Mr_LMT@163.com

导师(通讯作者):朱海永(1982-),男,副教授,博士,主要研究方向为固体激光及非线性光学. Email:hyzhu@wzu.edu.cn

收稿日期:2017-07-15;录用日期:2017-10-10

<http://www.photon.ac.cn>

power of 3.2 W was obtained using the output coupler with 30% transmittance. The calculated peak power was up to 6.3 kW as corresponding pulse width and pulse repetition frequency of 9.7 ns and 52 kHz, respectively.

Key words: Passively Q-switched; Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG; Saturable absorber; 1 064 nm laser; LD diode-pumped

OCIS Codes: 140.3460; 140.3480; 140.3580; 140.3540; 140.3530

0 引言

激光二极管(Laser Diode, LD)抽运的调Q激光器已被广泛应用于激光测距、激光制导、激光医疗等领域^[1-2].相对于采用声光调Q、电光调Q等主动调Q技术,被动调Q激光器由于具有结构简单、价格低廉、易于运转等优点,吸引了研究人员广泛的关注.目前常用的被动调Q材料有:染料(BDN染料^[3-4])、可饱和吸收晶体(色心晶体^[5-6]和掺Cr⁴⁺的晶体^[7-9])、半导体可饱和吸收镜^[10]、新型碳基可饱和吸收材料(石墨烯^[11-13]和碳纳米管^[14])和拓扑材料(碲化铋和硒化铋^[15]).其中,Cr⁴⁺:YAG可饱和吸收晶体具有热导性能好、损伤阈值高、光化学性质稳定、无退化现象等优点.而且Cr⁴⁺:YAG晶体在0.9~1.2 μm附近具有宽的吸收带和良好的可饱和吸收特性,特别适合用于1.06 μm掺Nd³⁺激光材料的被动调Q激光器.

1997年,A. Agnesi等将Cr⁴⁺:YAG晶体用于LD端面泵浦Nd:YAG激光的被动调Q输出,并对比初始透过率等参数优化输出脉冲能量和平均输出功率^[16].随着键合技术的发展,通过将Cr⁴⁺:YAG与激光晶体键合有利于实现结构紧凑、脉冲宽度窄、峰值功率高的微型脉冲激光器.2003年,Feldman等报道了LD抽运的Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG键合晶体被动调Q微片激光器^[17].在入射抽运光功率为9 W时,获得了超过2 W平均输出功率,5.6 ns脉冲宽度的激光输出.2014年,暨南大学江炜等报道了LD侧面抽运的Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG晶体被动调Q激光器.在187.5 W抽运功率下,获得83.68 W的1064 nm激光输出,并通过KTP进行倍频,获得27.2 W平均功率和210 ns脉冲宽度的532 nm激光输出^[9].目前,关于Cr⁴⁺:YAG晶体被动调Q激光器的报道较多,但相关文献中,由于实验条件不一样,所出现的实验现象存在着差异.例如,随着抽运功率升高,脉冲宽度有的变化不明显,有的呈减小趋势^[18-20];对比不同透过率输出镜时,随着输出镜透过率的增大,脉冲宽度有的增大,有的减小^[21-24].本文综合考虑激光介质、被动调Q和热效应等因素,采用LD端面抽运Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG晶体,对比了不同初始透过率下的调Q激光输出特性,以及不同耦合输出镜透过率对调Q性能的影响.实验结果表明,在不同的抽运功率下,分别对应一个最佳的输出镜透过率使得输出功率和重复频率最高,脉冲宽度最窄.

1 实验装置

图1为LD端面抽运Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG键合晶体被动调Q激光实验装置.抽运源为808 nm光纤耦合输出的半导体激光器,光纤芯径为100 μm,数值孔径为0.22.由光纤输出的抽运光经一对焦距分别为30 mm和100 mm的透镜组成的耦合系统,聚焦成束腰直径约为330 μm的光斑入射到键合晶体内.实验中采用两种不同掺Cr⁴⁺浓度的Cr⁴⁺:YAG晶体(初始透过率分别为84.1%和90.6%)进行对比,掺Nd³⁺原子分数均为1.0%,键合后的晶体尺寸为3×3×15 mm³.两块不同初始透过率键合晶体均由7、3和5 mm的Nd:

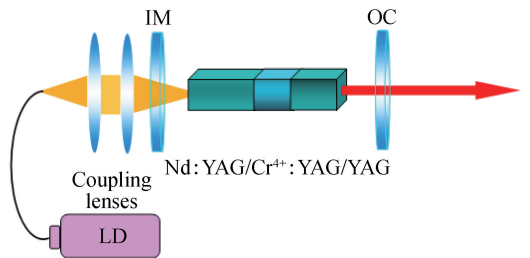


图1 LD端面抽运Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG键合晶体被动调Q激光实验装置

Fig.1 Schematic of LD end-pumped passively Q-switched laser with Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG composite crystal

YAG,Cr⁴⁺:YAG和YAG晶体组成.右端键合的一段未掺杂YAG晶体,用来提升Cr⁴⁺:YAG晶体的散热能力,提高Cr⁴⁺:YAG被动调Q激光的稳定性.为了使键合晶体中沉积的热量有效的释放,键合晶体侧面用钢箔包裹再置于铜块内,并用半导体制冷系统对其进行温控,使其温度保持在300 K左右.键合晶体两端镀有对808和1 064 nm波长增透的膜系.输入镜IM镀有对808 nm抽运光高透($T > 95\%$)和1 064 nm

波长高反($R > 99.9\%$)的膜系.输出镜 OC 镀有对 1 064 nm 波长部分透过的膜系.实验中为了研究被动调 Q 激光输出特性随输出镜透过率大小的变化关系,选择透过率分别为 10%、15%、30%、45% 和 60% 的输出镜片进行了实验对比.IM 和 OC 组成的谐振腔腔长约为 42 mm.

2 实验结果与分析

2.1 不同初始透过率下的激光特性对比

首先,采用 30% 透过率的耦合输出镜进行实验,对比了 84.1% 和 90.6% 两种初始透过率下的 1 064 nm 激光输出特性.图 2 给出了平均输出功率随入射抽运功率的变化情况.从输出功率曲线可以看出,平均输出功率随入射抽运功率的增加而增加.另外,90.6% 初始透过率的激光器具更高的平均输出功率和较低的激光阈值.与 90.6% 初始透过率的 Cr⁴⁺:YAG 晶体相比,84.1% 初始透过率的 Cr⁴⁺:YAG 晶体达到饱和所吸收的光强相对较大,增加了谐振腔内的损耗,从而使得激光阈值较高,平均输出功率较低.在 10.4 W 的入射抽运功率下,对不同初始透过率的激光器进行优化,84.1% 和 90.6% 初始透过率的键合晶体,分别获得 3.2 和 3.9 W 的最大平均输出功率,对应的斜效率分别为 37.2% 和 43.3%.

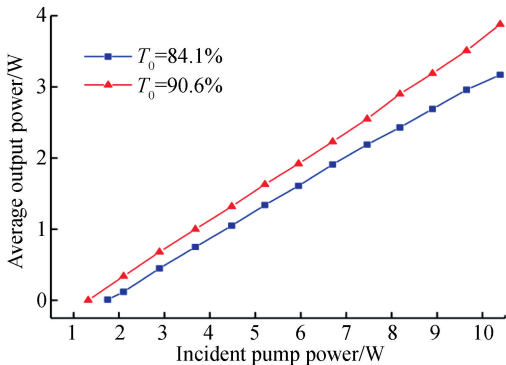


图 2 初始透过率分别为 84.1% 和 90.6% 时的输出功率
Fig.2 The output power with the initial transmission (T_0) of 84.1% and 90.6%

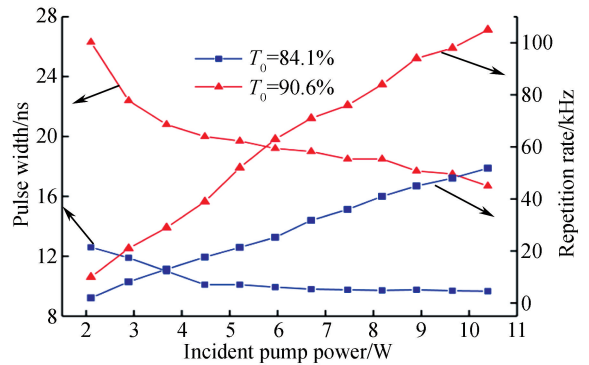


图 3 不同初始透过率下,脉冲宽度和重复频率与抽运功率的关系
Fig.3 Pulse width and repetition frequency versus incident pump power with different initial transmission (T_0)

实验中采用 4 GHz 自由空间钢砷化镓探测器对激光输出脉冲信号进行探测,并用 500 MHz 泰克数字示波器(型号 DPO3052B)记录了 1 064 nm 激光的脉冲波形及脉冲序列.图 3 给出了不同初始透过率下,脉冲宽度和重复频率随入射抽运功率的变化关系.由图可知,在相同的抽运功率下,相对于 90.6% 初始透过率的键合晶体,采用 84.1% 初始透过率的键合晶体所获得的激光脉冲宽度窄、重复频率低.这是因为,可饱和吸收体初始透过率降低时,其两次被漂白的的时间间隔变长,从而使得脉冲重复频减小;同时由于腔内激光关断时间长,使得增益介质上能级积累的反转粒子数较多,当可饱和吸收体达到饱和时,脉冲建立和熄灭的时间变短.当入射抽运功率升高到 10.4 W 时,84.1% 和 90.6% 两种初始透过率下的激光器分别获得脉冲宽度为 9.7 和 16.7 ns、重复频率为 52 和 105 kHz 的激光输出,通过计算得到峰值功率分别为 6.3 和 2.2 kW.与 90.6% 初始透过率的 Cr⁴⁺:YAG 晶体相比,虽然 84.1% 初始透过率下的激光平均输出功率偏低,但其相应的脉冲宽度较窄、重复频率较低,从而使得峰值功率明显提高.

2.2 不同输出镜透过率下的激光输出特性

为了进一步研究耦合输出镜透过率对 1 064 nm 激光输出特性的影响,选择 84.1% 初始透过率的键合晶体,在不同耦合输出镜透过率下对系统进行优化并对输出特性参数进行了对比.图 4 为不同耦合输出镜透过率下的平均输出功率随入射抽运功率的变化关系.从图中可以看出,激光阈值随着耦合输出透镜透过率的增大而增大,并且随着入射抽运功率的增加,激光平均输出功率线性升高.在 10.4 W 的入射抽运功率下,使用 30% 的耦合输出镜时获得最大平均功率 3.2 W 的激光输出.

图 5 给出了重复频率随抽运功率和耦合输出镜透过率的变化情况.由图可知,随着抽运功率的增大,1064 nm 激光的重复频率明显增大.这是因为,随着抽运功率的增加,抽运速率加快,增益介质上能级反转粒子数密度增长速度加快,继而加快了谐振腔内自发辐射光子数密度的增长速度,从而使得可饱和吸收体

$\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 两次被漂白的时间间隔缩短,最终导致重复频率变大.图中还可以看出,当入射抽运功率低于 4 W 时,在相同入射抽运功率下,随着耦合输出镜透过率的减小,谐振腔内的透射损耗减小,可饱和吸收体两次被漂白的的时间间隔缩短,使得重复频率增大.在此基础上,继续增加入射抽运功率时,由于 10% 和 15% 这两种耦合输出透镜的透过率太小,使得谐振腔内 1 064 nm 激光功率密度增加,激光不能有效输出,延长了可饱和吸收体处于饱和状态的时间,进而导致重复频率有所减小.当入射抽运功率增加到 10.4 W 时,在耦合输出镜透过率为 30% 的情况下获得最大的重复频率.因此,对于不同入射抽运功率下,耦合输出镜同样存在着一个最佳透过率使得重复频率最大.

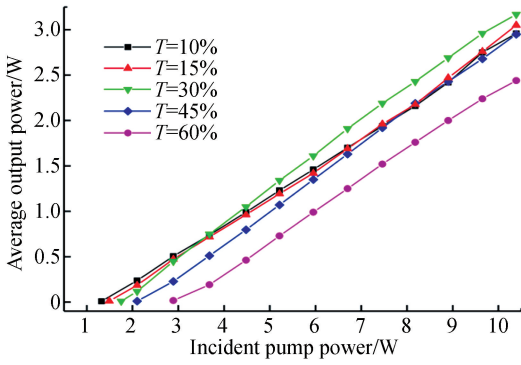


图 4 不同输出镜透过率下,被动调 Q 激光的平均输出功率
Fig.4 Average output power of passively Q-switched laser with different output coupler transmittance (T)

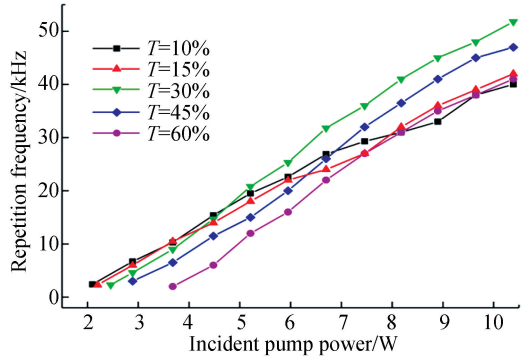


图 5 不同输出镜透过率下,重复频率随抽运功率的变化情况
Fig.5 Pulse repetition frequency versus incident pump power in different output coupler transmittance (T)

图 6 为重复频率随抽运功率和耦合输出镜透过率变化情况.实验结果表明,随着入射抽运功率的增大,从阈值开始脉冲宽度减小的幅度较大,但是当抽运功率增加到一定程度时便趋于饱和.同样,在不同的抽运功率下,使得脉冲宽度最窄对应的耦合输出镜最佳透过率不同.从激光阈值开始,随着抽运功率的升高,在可饱和吸收体漂白时,增益介质上能级积累的反转粒子数增多,脉冲建立和熄灭的速度加快,使得脉冲宽度变窄.但是,当抽运功率增加到一定值时,在可饱和吸收体漂白之前,激光介质上能级积累的反转粒子数已接近饱和,导致抽运功率对脉冲宽度产生的影响较小,表现为脉冲宽度基本保持不变.实验中,采用 45% 透过率的耦合输出镜,在抽运功率为 10.4 W 时,获得最窄脉冲宽度约为 8.7 ns,对应的重复频率为 47 kHz,脉冲波形及脉冲序列如图 7 所示.

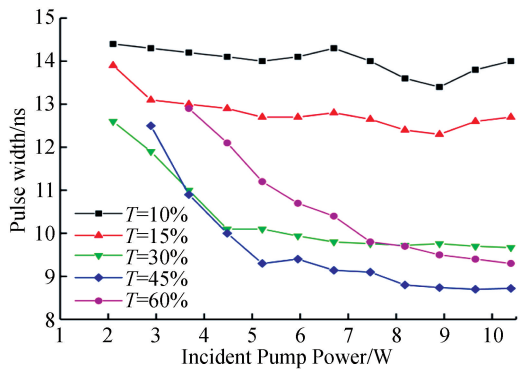


图 6 脉冲宽度随抽运功率和耦合输出镜透过率的变化关系
Fig.6 The pulse width versus incident pump power and different output coupler transmittance (T)

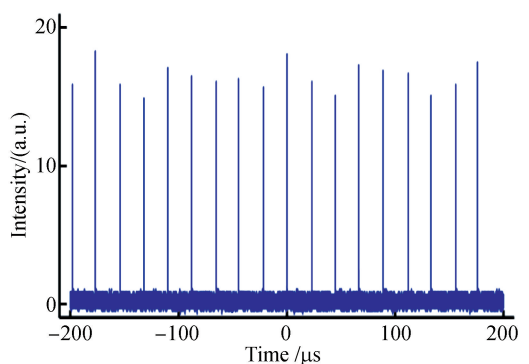
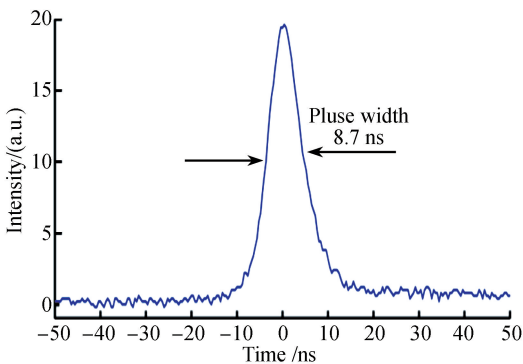


图 7 输出镜透过率 $T=45\%$ 时,被动调 Q 激光的脉冲波形及脉冲序列
Fig.7 The temporal pulse profile and pulse train of Q-switched laser with the output coupler $T=45\%$

3 结论

对 LD 端面抽运的 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG 键合晶体的 1 064 nm 被动调 Q 激性能进行了研究.综合考虑激光介质、被动调 Q 和热效应等因素,设计了两种 Cr⁴⁺:YAG 初始透过率(84.1%和 90.6%)的三段式键合晶体进行调 Q 激光实验.采用多种透过率的耦合输出镜对脉冲激光输出特性进行对比分析.实验结果表明,虽然 84.1%初始透过率的晶体获得的平均输出功率偏低,但是对应的脉冲宽度较窄、重复频率较低,使其峰值功率得到显著的提高.采用 30%透过率的耦合输出镜和 10.4 W 抽运功率下,获得了 3.2 W 平均输出功率、9.7 ns 脉冲宽度和 52 kHz 重复频率的激光输出,经计算可知峰值功率达 6.3 kW.重复频率和脉冲宽度等激光输出特性并没有随腔镜耦合透过率呈现单调递增或单调递减,而是在不同抽运功率下,分别存在一个使平均输出功率、重复频率和脉冲宽度等输出特性参数最优的最佳耦合输出镜透过率.所以,在一定抽运功率下要获得某一激光特性参数的最优值,需要合理设计耦合输出镜的透过率.

参考文献

- [1] MA Y, HE Y, YU X, *et al.* Multiple-beam, pulse-burst, passively Q-switched ceramic Nd:YAG laser under micro-lens array pumping[J]. *Optical Express*, 2015, **23**(19): 24955-24961.
- [2] FENG C, LIU M, LI Y, *et al.* Gold nanorods saturable absorber for Q-switched Nd:GAGG lasers at 1 μm[J]. *Applied Physics B*, 2017, **123**(3): 81.
- [3] WAN Y, ZHU D, ZENG Q, *et al.* Brewster-oriented passive Q-switch intracavity optical parametric oscillator[J]. *Chinese Physics*, 2005, **14**(4): 714-719.
- [4] OUSLIMANI H, BASTRAD L, BROQUIN J. Narrow-linewidth Q-switched DBR laser on Ytterbium-doped glass[J]. *Ceramics International*, 2015, **41**(7): 8650-8654
- [5] MEN S, LIU Z, CONG Z, *et al.* Tunable narrow line-width LiF:F²⁻(-) color center laser[J]. *Optics Communication*, 2014, **324**(15): 160-164.
- [6] MEN S, LIU Z, CONG Z, *et al.* High-repetition-rate widely tunable LiF:F²⁻(-) color center lasers[J]. *Laser Physics*, 2016, **26**(2): 205806.
- [7] JAMBUNATHAN V, NAVRATIL P, MIURA T, *et al.* Cryogenic Yb:YAG ceramic laser pumped at 940 nm and zero-phonon-line: a comparative study[J]. *Optical Materials Express*, 2017, **7**(2): 477-483.
- [8] PAVEL N, DASCALU T, SALAMU G, *et al.* Ignition of an automobile engine by high-peak power Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG laser-spark devices[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(26): 33028-33037.
- [9] JIANG Wei, HE Qing, CHEN Zhen-qiang, *et al.* LD Side-pumped laser based on Nd:YAG/Cr:YAG/YAG composite crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0414002.
江炜,何青,陈振强,等.基于 Nd:YAG/Cr:YAG/YAG 键合晶体 LD 侧面泵浦激光器[J].光子学报,2014,**43**(4): 0414002.
- [10] WARITANTANT T, MAJOR A. Discretely selectable multiwavelength operation of a semiconductor saturable absorber mirror mode-locked Nd:YVO₄ laser[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(17): 3331-3334.
- [11] AHMAD H, ZULKIFLI A Z, THAMBIRATNAM K. Tunable Q-switched erbium-doped fiber laser based on curved multimode fiber and grapheneoxide saturable absorber[J]. *Laser Physics*, 2017, **27**(5): 055103.
- [12] FENG De-jun, HUANG Wen-yu, JIANG Zhou-zhen, *et al.* Few-layer graphene membrane as an ultrafast mode-locker in erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(5): 054202.
冯德军,黄文育,姜守振,等.基于少数石墨烯可饱和吸收的锁模光纤激光器[J].物理学报,2013,**62**(5):054202.
- [13] LIN W, DUAN X, CUI Z, *et al.* A passively Q-switched Ho:YVO₄ laser at 2.05 μm with graphene saturable absorber [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2016, **6**(5): 128-134.
- [14] ORTEG M G, KUZIN E, ZACA M P, *et al.* Photodeposition of SWCNTs onto the optical fiber end to assemble a Q-switched Er³⁺-doped fiber laser[J]. *Optics And laser technology*, 2016, **91**(1): 32-35.
- [15] CHEN Y, ZHAO C, CHEN S, *et al.* Large energy, wavelength widely tunable, topological insulator Q-switched erbium-doped fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, **20**(5): 315-322.
- [16] AGNESI A, DELL A S, CHEBEL M B, *et al.* Diode-pumped neodymium lasers repetitively Q-switched by Cr:YAG solid-state saturable absorbers[J]. *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electron*, 1997, **3**(1): 45-52.
- [17] FELDMAN R, SHIMONY Y, BURSHTAIN Z. Passive Q-switching in Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG monolithic microchip laser[J]. *Optical Materials*, 2003, **24**(1-2): 393-399.
- [18] HE Y, MA Y, LI J, *et al.* Continuous-wave and passively Q-switched 1.06 μm ceramic Nd:YAG laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, **81**: 46-49.
- [19] LIU F, XIA H, PAN S, *et al.* Passively Q-switched Nd:LuVO₄ laser using Cr⁴⁺:YAG as saturable absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(7): 1449-1453.

- [20] ZHANG X, ZHAO S, WANG Q, *et al.* Laser diode pumped $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q-switched $\text{Nd}^{3+}:\text{S-FAP}$ laser[J]. *Optics Communication*, 1998, **155**(1-3): 55-60.
- [21] JIANG Xin-Ying, ZHENG Jian-Gang, DUAN Wen-Tao, *et al.* Theoretical and experimental research on output characteristics of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q-switched laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3): 586-588.
蒋新颖, 郑建刚, 段文涛, 等. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器输出特性[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3): 586-588.
- [22] ZHANG Xue-xia, GE Ting-wu, DING Xing, *et al.* Study of continuous fiber laser with distributed pump structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(9): 1071-1075
张雪霞, 葛廷武, 丁星, 等. 分布式抽运连续光纤激光器研究[J]. *发光学报*, 2016, **37**(9): 1071-1075
- [23] KANG Zhe, LIU Ming-yi, LIU Cheng-zhi, *et al.* Passively Q-switched Yb^{3+} -doped fiber laser based on microfiber-single wall carbon nanotube saturable absorber[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, **38**(5): 630-635.
康喆, 刘明奕, 刘承志, 等. 基于微纳光纤-单壁碳纳米管可饱和吸收体的被动调 Q 掺镱光纤激光器[J]. *发光学报*, 2017, **38**(5): 630-635.
- [24] WANG H, YANG X, ZHAO S, *et al.* 2 ns pulse, compact and reliable microchip lasers by $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ composite crystal[J]. *Solid State and Liquid Lasers*, 2009, **19**(8): 1824-1827.