

Yb:YAG 陶瓷强化 Cr,Yb:YAG 自调 Q 微片激光器性能研究

程莹 马剑 董俊

(厦门大学信息科学与技术学院电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要 报道了通过键合 Yb:YAG 激光陶瓷来强化 Cr,Yb:YAG 自调 Q 微片激光器激光性能的研究结果。实现了 Yb:YAG/Cr,Yb:YAG 自调 Q 微片激光器的激光输出。当吸收抽运功率为 7.1 W 时获得了 0.53 W 的自调 Q 激光输出,对应的光-光转换效率为 7.5%。在实验中获得脉冲能量大于 25 μJ 、脉冲宽度小于 3 ns、峰值功率高达 9 kW 的自调 Q 激光脉冲输出。同时研究了输出耦合镜透射率对 Yb:YAG/Cr,Yb:YAG 自调 Q 微片激光器激光性能的影响。

关键词 激光技术;Yb:YAG 激光陶瓷;Cr,Yb:YAG 晶体;自调 Q 激光器;微片激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0102006

Enhancement of Cr,Yb:YAG Self-Q-Switched Microchip Laser by Bonding Yb:YAG Ceramic

Cheng Ying Ma Jian Dong Jun

(Department of Electronics Engineering, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract Enhancement of Cr,Yb:YAG self-Q-switched microchip laser by bonding Yb:YAG ceramic is investigated. Yb:YAG/Cr,Yb:YAG self-Q-switched microchip lasers is demonstrated. Average output power of 0.53 W is obtained under absorbed pump power of 7.1 W. Laser pulses with pulse energy over 25 μJ , pulse width shorter than 3 ns and peak power over 9 kW are achieved. The effect of transmission of output coupler on the laser performance is also addressed.

Key words laser technology; Yb:YAG laser ceramic; Cr,Yb:YAG crystal; self-Q-switched laser; microchip laser

OCIS codes 140.3380; 140.3540; 140.3615; 140.3480; 140.3580

1 引 言

激光二极管抽运的 Cr^{4+} :YAG 作为可饱和吸收体被动调 Q 微片激光器可实现高光束质量、高峰值功率、亚纳秒激光脉冲输出,在激光加工、激光测距、激光点火、遥感及环境污染监测等领域有极其广泛的应用,因而成为了固体激光器领域的一个研究热点。而且微片激光器简单的结构使得激光器的小

型化和光学系统的集成化成为可能。通常用于被动调 Q 激光器的激光增益介质是稀土离子掺杂的 YAG 晶体,稀土离子掺杂的 YAG 晶体不仅具有良好的光学特性、机械性能和高的化学稳定性,而且可以通过在稀土离子掺杂的 YAG 晶体中共掺 Cr^{4+} 获得性能优良的自调 Q 激光晶体^[1~3]。中国科学院上海光学精密机械研究所^[3~5]成功地生长了 Cr,

收稿日期: 2012-07-23; **收到修改稿日期**: 2012-09-07

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-09-0669)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20100121120019)资助课题。

作者简介: 程莹(1988—),女,硕士研究生,主要从事激光二极管抽运的被动调 Q 固体激光器方面的研究。

E-mail: chengying07@qq.com

导师简介: 董俊(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事激光陶瓷材料的制备及固体激光技术等方面的研究。

E-mail: jdong@xmu.edu.cn(通信联系人)

Yb:YAG自调Q激光晶体并系统地报道了该晶体的光学及激光性能。随后报道了激光二极管抽运的Cr,Yb:YAG微片激光器的性能,采用1 mm厚、Yb³⁺离子数分数为10%、Cr⁴⁺离子数分数为0.025%的Cr,Yb:YAG晶体获得了脉冲宽度为440 ps、峰值功率高达53 kW的自调Q脉冲激光输出^[6]。然而由于在Yb:YAG晶体中共掺了Cr⁴⁺,晶体中的缺陷增加,晶体的荧光寿命大幅下降^[7],而且Cr⁴⁺在Yb:YAG晶体的吸收峰处有很强的吸收(约占其在峰值吸收波长处的60%),因此激光的效率低。厦门大学Zhou等^[8]报道了采用Yb:YAG晶体强化Cr,Yb:YAG自调Q激光器性能的研究结果。通过在Cr,Yb:YAG晶体前面捆绑Yb:YAG晶体,采用腔长为70 mm的平-凹腔获得了光-光转换效率高达20%的自调Q激光输出。最近该课题组又报道了Yb:YAG激光陶瓷及晶体强化Cr,Yb:YAG自调Q激光器激光性能的研究结果^[9]。激光陶瓷制备技术使复合激光材料的制备工艺更加简单化^[10,11],从而使得通过激光陶瓷制备技术来实现复合Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q激光材料获得高效激光输出成为可能。本文报道了Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器的激光性能,研究了Yb:YAG激光陶瓷对Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器激光性能的影响,研究了不同输出耦合镜透射率对激光性能的影响以及激光器腔内不同微片对激光输出纵模模式的选择和激光脉冲稳定性的影响。

2 实验装置

激光二极管抽运的通过键合Yb:YAG透明激光陶瓷的Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器实验装置如图1所示。实验使用光纤耦合的940 nm激光二极管作为抽运源,光纤的孔芯为200 μm,数值孔径为0.22。激光二极管抽运源输出的连续激光先经过一个焦距为8 mm的透镜准直后,再通过一个焦距为8 mm的透镜聚焦在Yb:YAG陶瓷上,经光学耦合系统整形及聚焦后入射到Yb:YAG陶瓷上的抽运光大约为95%,抽运光斑直径约为160 μm。激光谐振腔是由加工成平行平面的Yb:YAG激光陶瓷薄片、Cr,Yb:YAG晶体薄片和平面反射镜组成“三明治”结构的平-平腔。Yb:YAG激光陶瓷的原子数分数为10%,厚度为1.5 mm,用于吸收大部分抽运功率。Yb:YAG激光陶瓷的一面镀940 nm的增透(AR)膜和1.03 μm的高反(HR)膜作为激光后腔镜,另一面镀1030 nm增透膜以减少腔内损

耗。自调Q激光晶体Cr,Yb:YAG的厚度为0.5 mm,Yb³⁺的离子数分数为10%,Cr⁴⁺的离子数分数为0.025%。自调Q激光晶体Cr,Yb:YAG的两个表面没有镀膜,均加工抛光成激光量级的平行平面。Cr,Yb:YAG自调Q激光晶体薄片放置在Yb:YAG陶瓷和输出耦合平面镜之间作为自调Q激光元件引起脉冲激光振荡,增强激光性能。用于激光实验的平行平面输出耦合镜的透射率 T_{oc} 分别为30%、40%和50%。实验在室温下运行,没有对激光增益介质进行主动冷却。输出的调Q脉冲使用InGaAs光电倍增管探测,并采用400 MHz的Tektronix TDS 380数字示波器来记录调Q波形及脉冲序列。用激光功率计来测量激光输出功率。激光输出的波长及纵模模式采用日本安腾(AQ6317B)光谱分析仪来测试分析。

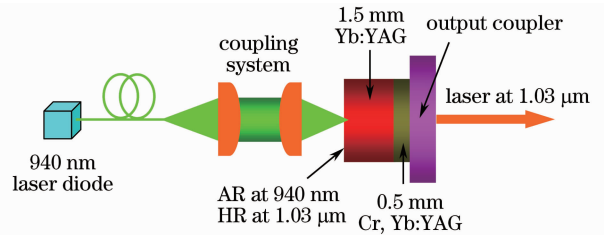


图1 Yb:YAG陶瓷强化Cr,Yb:YAG自调Q激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for enhancement of Cr,Yb:YAG self-Q-switched laser by bonding Yb:YAG ceramic

3 结果与讨论

Yb:YAG陶瓷强化Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器激光性能的核心是用Yb:YAG透明激光陶瓷作为增益介质吸收大部分抽运功率,剩余的抽运光进一步被Cr,Yb:YAG晶体吸收来增加激活粒子的反转数和对抽运光的吸收效率。因此Cr,Yb:YAG自调Q激光晶体在这里不仅作为调Q元件,而且作为激光增益介质来吸收抽运光。在940 nm光纤耦合激光二极管的抽运下,采用不同透射率的输出耦合镜获得了1030 nm的调Q激光脉冲输出。

图2给出了Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q激光器的平均输出功率随吸收抽运功率的变化情况。在不同输出镜透射率 T_{oc} 情况下,Yb:YAG/Cr,Yb:YAG微片激光器的激光阈值也各不相同, T_{oc} 分别为30%、40%和50%时对应Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q激光器输出激光的抽运阈值分别为1.40、1.53、1.88 W。Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调

Q微片激光器的阈值随着输出耦合镜透射率的增加而增加。当 T_{oc} 为30%和40%时,平均输出功率随吸收抽运功率的增加呈线性增加趋势,斜率效率分别为10%和8.2%。在吸收抽运功率为7.07 W的情形下,对于 T_{oc} 为30%和40%而言,最大的平均输出功率分别为530 mW和467 mW,对应的光-光转换效率分别为7.5%和6.6%。而对于 $T_{oc}=50\%$ 的情形,平均输出功率先随抽运功率的增加线性增加,然而当激光抽运功率上升到2.93 W时,平均输出功率开始下降。这主要是由于在采用高透射率的输出耦合镜的情况下,激光腔内的损耗增加,需要高的抽运光功率密度来实现激光粒子数的反转,然而随着抽运光功率的增加,在Yb:YAG激光陶瓷及Cr,Yb:YAG自调Q激光晶体上所产生的热量也增加,而Yb:YAG激光材料对温度特别敏感,光学性能随温度的升高而变差,从而使得激光的性能变差。Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器效率低的原因主要是由于在实验中采用了较厚的Yb:YAG陶瓷以及Yb:YAG和Cr,Yb:YAG晶体在1030 nm处的自吸收损耗所造成的。采用端面抽运的方式,激光增益介质对抽运光的吸收随材料的长度呈指数衰减,因此采用厚的Yb:YAG激光陶瓷导致了抽运光在靠近Cr,Yb:YAG晶体一端的Yb:YAG陶瓷和Cr,Yb:YAG晶体中的抽运光强度低,粒子反转数较小,再加上Yb³⁺掺杂的激光材料在激光波长1030 nm处有一定的自吸收,从而使Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器腔内的损耗增加,激光转换效率低。通过优化Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器中Yb:YAG陶瓷的厚度来改善抽运光在Yb:YAG陶瓷和Cr,Yb:YAG晶体中的分布实现高粒子数反转,可以有效提升Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q激光器的效率。

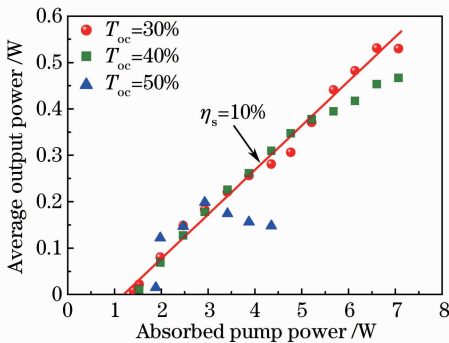


图2 平均输出功率随吸收抽运功率的变化曲线

Fig. 2 Average output power as a function of absorbed pump power

图3给出了 $T_{oc}=30\%$ 时,Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q激光器发射激光光谱随吸收抽运功率的变化情况。由于Yb:YAG及Cr,Yb:YAG激光材料的发射光光谱较宽(在峰值发射波长1030 nm处的发射谱谱宽约为9 nm),因此采用激光材料厚度为毫米量级的微片作为激光增益介质通常是多纵模振荡。从光谱中可以看出,激光器的纵模数随吸收抽运光功率的增大而增加。当吸收抽运光功率小于1.98 W时,激光工作在单模状态;当吸收抽运功率从1.98 W增加到3.87 W时,激光纵模数为两个;当吸收抽运光功率继续增加到5.68 W以下,激光纵模增加为3个;当吸收抽运光功率高于5.68 W,产生了4个纵模。测得的纵模间隔为0.58 nm,远大于由激光谐振腔腔所决定的自由光谱范围: $\Delta\lambda_c = \lambda^2 / (2L_c) = 0.0146$ nm,其中 λ 为激光发射波长, L_c 为谐振腔光学长度。

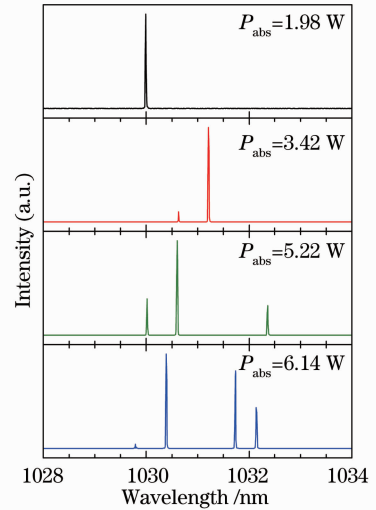


图3 不同吸收抽运功率下的激光光谱

Fig. 3 Laser emitting spectra under different absorbed pump power

同时观察到不同纵模模式之间还存在着强烈的相互竞争,特别是在高功率抽运的情形下,纵模之间的相互竞争更为激烈,使一些应该出现的纵模消失,从而导致纵模间距变宽,一些通过激光增益介质微片选模而造成的增益较小的纵模也可以振荡,激光输出的纵模模式变得更加复杂。造成纵模之间间距变宽的原因主要是由腔内不同激光增益介质微片所构成的倾斜标准具效应。实际输出的激光纵模模式是由0.5 mm厚的Cr,Yb:YAG、1.5 mm厚的Yb:YAG平面薄片及2 mm厚的平行平面输出耦合镜共同作为腔内标准具选择出来的。

图4给出了 $T_{oc}=30\%$,吸收抽运功率为

2.47 W时的一组典型的脉冲序列及单个脉冲波形。Yb:YAG/Cr,Yb:YAG 自调 Q 微片激光在此抽运光功率下是工作在两个纵模振荡的状态,因此激光输出脉冲的序列呈现高低交替的规律变化,整体变化较为稳定。脉冲的重复频率为7.25 kHz。尽管不同纵模所对应的激光脉冲的幅度有一定差别,如图 4(a)所示,但是单个脉冲能量的变化不大,经测量单个脉冲的能量为 20.5 μ J,脉冲半峰全宽(FWHM)为 3.2 ns,相应的脉冲峰值功率为6.4 kW。

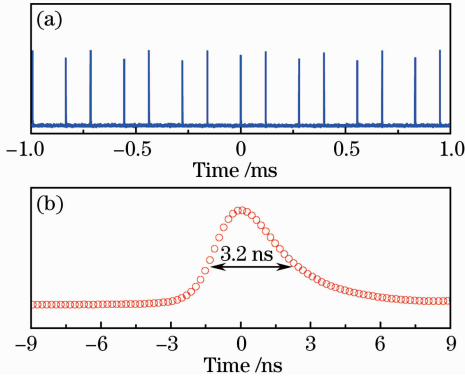


图 4 (a)典型的输出激光脉冲序列和(b)单个脉冲波形
Fig. 4 (a) Typical laser pulse trains and (b) single pulse profile

图 5 给出了不同输出耦合镜透射率情况下 Yb:YAG/Cr,Yb:YAG 自调 Q 微片激光器输出激光脉冲序列重复频率随吸收抽运光功率变化的曲线。对于不同 T_{oc} ,开始时输出激光脉冲序列的重复频率均随抽运光功率的增大而线性增加。然而对于不同的输出耦合透射率,激光脉冲序列重复频率随吸收抽运光变化的情况各不相同。当 $T_{oc}=30\%$,抽运光功率从 1.4 W 增加到 7.07 W 时,重复频率从 0.525 kHz 上升到 30 kHz。然而在不同的抽运光功率范围内重复频率随抽运光功率增加的速率有所不同。

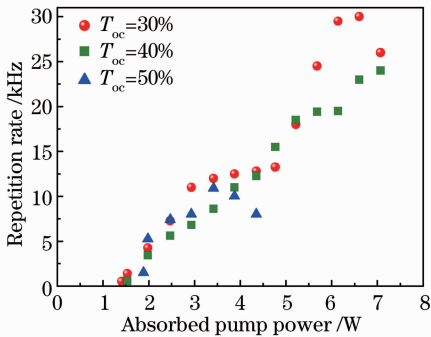


图 5 不同输出耦合透射率情况下脉冲重复频率随吸收抽运功率的变化
Fig. 5 Repetition rate as a function of absorbed pump power with different transmissions of output couplers

同。当吸收抽运功率低于 3 W 时,重复频率的增加速率为 6.7kHz/W。当吸收抽运光功率高于 3 W 而低于 4.8 W 时,重复频率的增加速率较慢为 0.9 kHz/W。当吸收抽运光功率高于 4.8 W 且低于 6.14 W 时,重复频率的增加速率为 12.5 kHz/W。当吸收抽运功率大于 6.14 W 时,激光脉冲重复率随抽运光功率的增加缓慢增加到 30 kHz,然后随抽运光功率的进一步增加而降低。重复频率在不同抽运功率阶段内不同的增长速率主要是由于在增大抽运功率过程中,激光腔内出现了多模振荡并且模式之间相互竞争造成的。

图 6 给出了输出激光脉冲宽度随抽运光功率增加的变化曲线。对于不同的 T_{oc} ,输出脉冲激光的脉冲宽度随着抽运光功率的增大改变不大。对于 $T_{oc}=30\%$ 的情形,脉冲宽度随抽运光功率的增加从 2.9 ns 缓慢上升到 3.75 ns,而当吸收抽运功率高于 5.7 W 后,脉冲宽度基本不随抽运光功率的增加而变化,约为 3.8 ns。

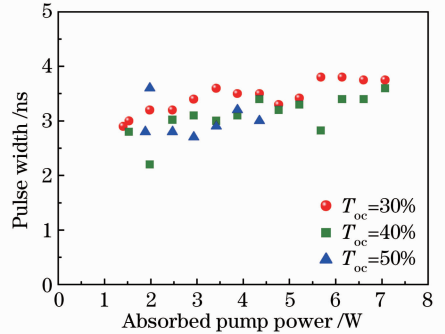


图 6 脉冲宽度随吸收抽运光功率的变化
Fig. 6 Pulse width as a function of absorbed pump power

图 7 和图 8 分别给出 Yb:YAG/Cr,Yb:YAG 自调 Q 微片激光器输出激光脉冲能量和峰值功率随抽运光功率变化的情况。在不同输出耦合镜透射率下,脉冲能量随吸收抽运功率的变化很小,基本保持在 20 μ J 左右,而且输出耦合镜透射率对激光输出脉冲能量的影响较小,这主要是由于 Cr,Yb:YAG 晶体中 Cr^{4+} 离子数分数较小,可饱和吸收体 Cr^{4+} 的调制作用较小。同样从图 8 可以看出,激光输出的峰值功率随吸收抽运功率的变化也不明显,基本保持在 6~9 kW 之间,这主要是由于激光脉冲宽度基本上与吸收抽运功率无关,因而激光脉冲的峰值功率随吸收抽运功率的变化与脉冲能量的变化相似。

综合以上实验结果,影响 Yb:YAG 陶瓷强化

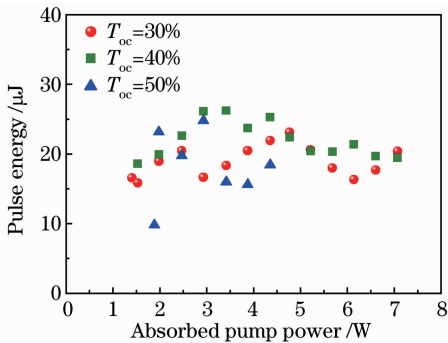


图7 脉冲能量随吸收抽运功率的变化

Fig. 7 Pulse energy as a function of absorbed pump power

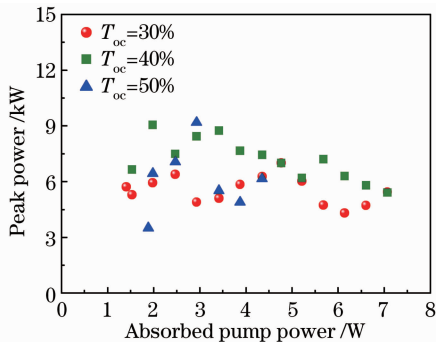


图8 峰值功率随吸收抽运功率的变化

Fig. 8 Peak power as a function of absorbed pump power

Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器激光性能的因素主要有所用强化激光材料Yb:YAG的厚度、输出耦合镜的透射率、自调Q激光晶体Cr,Yb:YAG的原子数分数及厚度等。与采用平-凹腔Yb:YAG激光陶瓷强化Cr,Yb:YAG自调激光器激光性能的研究结果^[9]相比,尽管Yb:YAG/Cr,Yb:YAG微片激光器的激光转换效率比较低,但通过采用微片激光器的形式获得了高功率、纳秒脉冲激光输出,同时通过实验可以看出目前有关Yb:YAG激光陶瓷强化Cr,Yb:YAG自调Q激光器激光性能的研究还有很大的提升空间,主要通过进一步优化强化激光性能的Yb:YAG陶瓷的厚度,在保证吸收足够抽运光的同时要保证Cr,Yb:YAG晶体所吸收的抽运光在Cr,Yb:YAG晶体中可产生导致激光振荡的粒子反转数。

4 结 论

报道了Yb:YAG陶瓷强化Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器的激光性能。Yb:YAG陶瓷强化Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器的实验研究是采用Yb:YAG陶瓷、Cr,Yb:YAG晶体及平行平面输出耦合镜的“三明治”微片激光器结构,在940 nm激

光二极管的抽运下获得了1030 nm的脉冲激光输出。研究表明,当输出耦合镜透射率为30%时,Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器的性能较好。当吸收抽运功率为7.07 W时,获得了平均输出功率0.53 W的激光输出,对应的光-光转换效率为7.5%。自调Q激光脉冲的重复频率可高达30 kHz,脉冲宽度3.75 ns,脉冲能量20.4 μJ,峰值功率5.44 kW。同时研究了不同输出耦合镜透射率对自调Q激光性能的影响,随着输出耦合镜透射率的增加,自调Q激光器的效率稍有下降,然而脉冲激光器的其他性能则略有提升,如果采用透射率为40%或者50%的输出耦合镜,在低的抽运功率下,Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器的脉冲能量可以高达25 μJ、脉冲宽度小于3 ns、峰值功率可以高达9 kW以上。因此Yb:YAG/Cr,Yb:YAG自调Q微片激光器的性能可以通过改变Yb:YAG陶瓷和Cr,Yb:YAG晶体的参数来进一步优化。

参 考 文 献

- 1 P. Wang, S. Zhou, K. K. Lee *et al.*. Picosecond laser pulse generation in a monolithic self-Q-switched solid-state laser[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **114**(5-6): 439~441
- 2 J. Dong, P. Deng, Y. Lu *et al.*. LD pumped Cr⁴⁺, Nd³⁺:YAG with self-Q-switched laser output of 1.4 W[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15): 1101~1103
- 3 J. Dong, P. Deng, Y. Liu *et al.*. Performance of the self-Q-switched Cr, Yb:YAG laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(3): 342~344
- 4 J. Dong, P. Deng, J. Xu. The growth of Cr⁴⁺, Yb³⁺:yttrium aluminum garnet (YAG) crystal and its absorption spectra properties[J]. *J. Crystal Growth*, 1999, **203**(1-2): 163~167
- 5 J. Dong, P. Deng, J. Xu. Spectral and luminescence properties of Cr⁴⁺ and Yb³⁺ ions in yttrium aluminum garnet (YAG)[J]. *Opt. Mater.*, 2000, **14**(2): 109~113
- 6 J. Dong, A. Shirakawa, S. Huang *et al.*. Stable laser-diode pumped microchip sub-nanosecond Cr, Yb:YAG self-Q-switched laser[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2005, **2**(8): 387~391
- 7 J. Dong, P. Deng. The effect of Cr concentration on emission cross section and fluorescence lifetime in Cr, Yb:YAG crystal[J]. *J. Lumin.*, 2003, **104**(1-2): 151~158
- 8 J. Y. Zhou, J. Ma, J. Dong *et al.*. Efficient, nanosecond self-Q-switched Cr, Yb:YAG lasers by bonding Yb:YAG crystal[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2011, **8**(8): 591~597
- 9 J. Dong, J. Ma, Y. Cheng *et al.*. Comparative study on enhancement of self-Q-switched Cr, Yb:YAG lasers by bonding Yb:YAG ceramic and crystal[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2011, **8**(12): 591~597
- 10 H. Yagi, K. Takaichi, K. Ueda *et al.*. The physical properties of composite YAG ceramics[J]. *Laser Phys.*, 2005, **15**(9): 1338~1344
- 11 J. Dong, K. Ueda, A. Shirakawa *et al.*. Composite Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG ceramics picosecond microchip lasers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14516~14523