

doi: 10.3788/gzxb20164503.0314009

LD 泵浦的被动调 Q Yb:YAG 薄片激光器实验研究

王旭^{1,2}, 程光华¹, 孙哲¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:采用中心波长为 940 nm 的激光二极管泵浦, 实现了 Yb:YAG 薄片的 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 激光输出. Yb:YAG 薄片掺杂 Yb³⁺ 离子浓度为 10%, 厚度为 500 μm. 理论上计算了 Yb:YAG 薄片在直接水冷方式与不同厚度 SiC 冷却方式下的温度分布. 实验中采用厚度 800 μm 的 SiC 冷却方式, 获得了最大功率 2.8 W 的 1 030 nm 连续激光输出, 输出功率相比直接水冷方式提高了 40%. 通过 Degnan 理论优化了被动调 Q 晶体 Cr⁴⁺:YAG 的初始透过率和输出耦合镜, 采用初始透过率为 93% 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体和透过率为 10% 的输出耦合镜, 在 800 μm SiC 冷却方式下, 获得了平均输出功率 1.95 W、单脉冲能量 1.2 mJ、脉冲宽度 74 ns、重复频率 1.6 kHz 的稳定调 Q 脉冲输出, 斜效率为 18.1%. 光束质量因子 $M_x^2=1.622, M_y^2=1.616$.

关键词:激光器; 固体激光器; 薄片激光器; 被动调 Q; SiC 冷却; Cr⁴⁺:YAG; Yb:YAG

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0314009-5

Research of LD-pumped Passively Q-switched Yb:YAG Thin Disk Laser

WANG Xu^{1,2}, CHENG Guang-hua¹, SUN Zhe¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Using 940 nm diode laser as pumping source, a passively Q-switched Yb:YAG thin disk laser by Cr⁴⁺:YAG was realized. The Yb:YAG disk with 500 μm thickness was employed, the Yb³⁺ atom fraction is 10%. The distribution of temperature in Yb:YAG disk with direct water cooling and SiC cooling with different thickness was theoretically simulated, respectively. The maximum output power of 2.8 W at 1 030 nm was obtained with 800 μm SiC cooling, the output power has increased by 40% than that obtained with direct water cooling. The initial transmission of Cr⁴⁺:YAG crystal and the output coupling rate were optimized by Degnan's theory. With the initial transmission of Cr⁴⁺:YAG crystal of 93% and the output coupling rate of 10%, a stable pulse train of 1.95 W averaged output power with a pulse energy of 1.2 mJ and pulse width of 74 ns were obtained with 800 μm SiC cooling. The repetition rate is 1.6 kHz, the slope efficiency is 18.1%, and the beam quality $M_x^2=1.622, M_y^2=1.616$.

Key words: Lasers; Solid state laser; Thin disk laser; Passively Q-switched; SiC cooling; Cr⁴⁺:YAG; Yb:YAG

OCIS Codes: 140.3540; 140.3480; 140.3615

0 引言

LD 泵浦被动调 Q 薄片激光器与传统调 Q 激光器相比, 具有结构紧凑、体积小、重量轻、重复频率高、脉

冲窄、峰值功率高等优点, 在光通信、遥感监测、激光微加工、非线性频率转换、三维成像等领域有着广泛的应用前景^[1]. 其中 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 晶体具有结构简单、损伤阈值高、导热性好、光化学性质稳定等优点, 而被

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61223007)和陕西省科学基金(No. Y235141D04)资助

第一作者: 王旭(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高功率固体激光器. Email: wangxu@opt.cn

导师(通讯作者): 程光华(1976—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为超短脉冲激光产生与放大及飞秒光刻波导技术. Email: gcheng@opt.ac.cn

收稿日期: 2015-10-14; 录用日期: 2015-12-07

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

广泛应用于被动调 Q 薄片激光器中^[2-3]. 在大多数被动调 Q 薄片激光器所使用的激光晶体中, Yb:YAG 晶体具有吸收带宽^[4]、荧光寿命长^[5]、量子效率高^[5]等优点, 因而 Cr³⁺:YAG 被动调 Q Yb:YAG 薄片激光器成为了固体激光器领域的一个研究热点^[6-7].

薄片激光晶体由于较大的口径/厚度比, 多采用端面泵浦、端面冷却的方式, 这种结构中晶体产生的热基本沿晶体的轴向传播^[8], 可以有效地减小热透镜效应, 减少热沉积. 然而由于 Yb:YAG 晶体的准三能级结构, 这种介质在热平衡状态时激光下能级粒子数浓度较高而引起的热问题^[9]严重影响激光器的输出特性, 因此设计一种有效的晶体冷却方式是十分必要的. 采用具有高导热系数和低热膨胀系数的材料, 例如金刚石、碳化硅^[10] (SiC) 等晶体进行冷却的方式成为一种有效的解决方法. 台湾交通大学^[11]采用金刚石对 Yb:YAG 晶体表面冷却的方法, 在泵浦功率 3.9 W 时获得了重复频率 3.3 kHz、脉冲宽度 650 ps、单脉冲能量 287 μ J 的调 Q 脉冲, 相比于传统冷却方式, 脉冲能量提高了 1.5 倍.

本文通过理论模拟计算对比了直接水冷和利用不同厚度 SiC 冷却两种方式, 根据对比结果采用厚度 800 μ m 的 SiC 对 Yb:YAG 薄片进行冷却, 在连续激光实验中, 获得最大输出功率为 2.8 W, 相比直接水冷方式, 输出功率提高了 40%. 在调 Q 激光实验中, 为了提高输出特性, 理论计算优化了 Cr³⁺:YAG 晶体初始透过率和输出耦合镜透过率, 利用初始透过率为 93% 的 Cr³⁺:YAG 晶体和透过率为 10% 的输出耦合镜, 获得了平均输出功率 1.95 W、单脉冲能量 1.2 mJ、脉冲宽度 74 ns、重复频率 1.6 kHz 的稳定 1 030 nm 激光脉冲输出.

1 不同冷却方式下 Yb:YAG 薄片温度分析

在连续泵浦情况下, 晶体的热传导为稳态问题. 柱坐标系下, 激光介质中热源的三维稳态热传导方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{q}{K_c} \quad (1)$$

式中 T 为晶体的温度分布, K_c 为晶体的热导率, q 为热源密度. 由于激光晶体和热源的圆对称性, 晶体上的温度分布也具有轴对称性, 即

$$T(r, z, \varphi) = T(r, z) \quad (2)$$

通过数值模拟方法求解热传导方程, 可以得到激光晶体内温度分布情况. 有限元分析方法^[12]和有限差分法是数值模拟中常用的两种方法, 本文采用有限元分析软件 ANSYS 对 Yb:YAG 薄片进行热分析.

图 1 为 Yb:YAG 薄片的冷却结构示意图, 薄片分别采用了与水直接接触 (如图 1(a) 所示)、SiC 冷却 (如

图 1(b) 所示) 两种方式进行冷却. 泵浦光通过端面泵浦进入晶体, 图 1(a) 中激光晶体 Yb:YAG 上表面和侧表面和空气自然对流换热, 下表面直接和水接触进行换热; 图 1(b) 中激光晶体 Yb:YAG 上表面、侧表面、SiC 与空气接触的表面和空气自然对流换热, SiC 的下表面直接和水接触进行换热, 激光晶体下表面和 SiC 上表面直接接触进行热传导. 端面均匀泵浦情况下^[13], 晶体的热源密度为

$$q = P_{\text{abs}} \eta / \pi r_p^2 l \quad (3)$$

式中 P_{abs} 为晶体吸收泵浦功率, η 为晶体生热率, r_p 为晶体泵浦光斑半径, l 为晶体长度. Yb:YAG 中 Yb³⁺ 离子掺杂浓度为 10%, 表 1 给出了 Yb:YAG 晶体和 SiC 晶体参数, 表 2 给出了有限元模拟的载荷和边界条件.

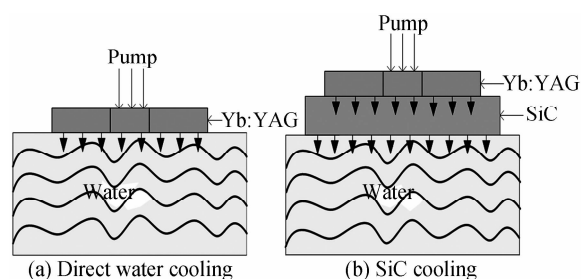


图 1 Yb:YAG 薄片冷却结构

Fig. 1 Schematic diagram of the cooling for Yb:YAG thin disk

表 1 晶体参数

Table 1 Materials parameter

Description	Yb:YAG	SiC
Radius/mm	5	6
Thickness/ μ m	500	300/500/800
Thermal conductivity/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	14	490
Coefficient of heat generation	9%	-

表 2 载荷和边界条件

Table 2 Load and boundary conditions

Description	Numerical Value
Pump power	24W
Absorbed pump power	19.44W
Radius of pump spot	600 μ m
Ambient temperature	20 $^{\circ}$ C
Heat generation density	$3.09 \times 10^9 \text{ W/m}^3$
Air convection coefficient	25W/ $\text{m}^2 \text{ K}$
Water convection coefficient	15 000W/ $\text{m}^2 \text{ K}$

模拟计算结果如图 2 所示, 图 2(a) 为直接水冷时薄片的温度分布, 薄片最高温度约为 60.6 $^{\circ}$ C, 最大温差为 40.6 $^{\circ}$ C; 图 2(b)、(c)、(d) 分别为厚度 300 μ m、500 μ m 和 800 μ m 的 SiC 冷却时 Yb:YAG 薄片的温度分布, 随着 SiC 晶体厚度的增加, 薄片最高温度逐渐降低, 当 SiC 厚度为 800 μ m 时, 晶体最高温度为 41.8 $^{\circ}$ C, 最大温差最小, 约为 21 $^{\circ}$ C. 可以看出 SiC 冷却方式优于直接水冷方式, 而对于不同厚度的 SiC 晶体, 800 μ m 厚度散热效果较好.

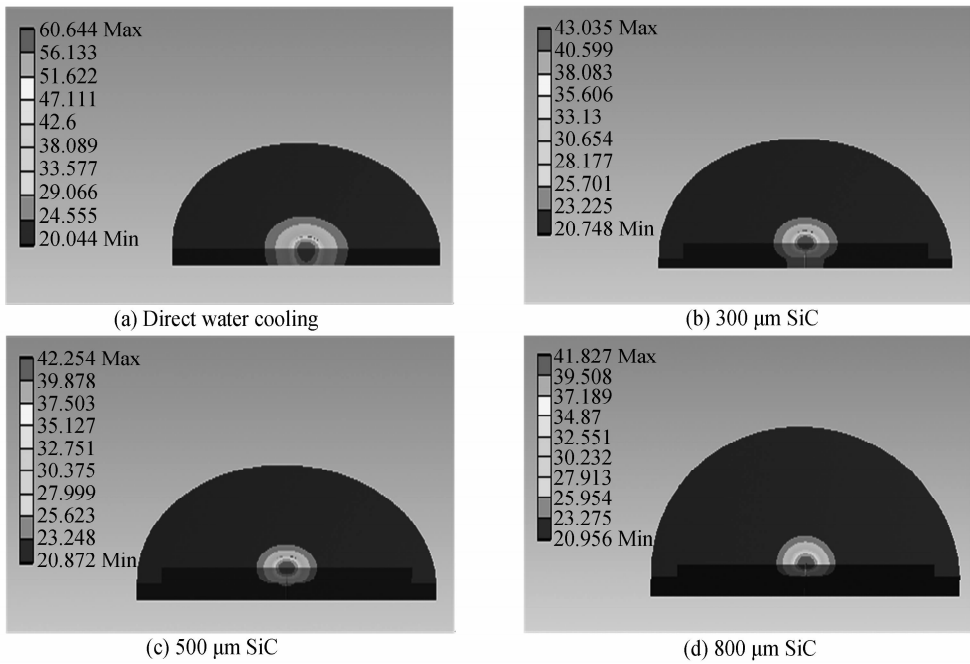


图2 不同冷却方式下Yb:YAG薄片温度分布
Fig. 2 Distribution of temperature in Yb:YAG disk with different cooling

2 实验研究

图3为LD泵浦的Cr⁴⁺:YAG被动调Q Yb:YAG薄片激光器实验装置图。实验使用最大输出功率为65 W的940 nm光纤耦合输出的激光二极管作为泵浦源,光纤纤芯半径为105 μm,数值孔径为0.22。尾纤输出的泵浦光经过一个焦距为30 mm的准直透镜准直后,再通过一个直角棱镜反射后被焦距为50 mm的中心打孔的聚焦透镜聚焦进入激光晶体Yb:YAG,未被吸收的泵浦光经过晶体后端面反射,第二次通过聚焦透镜,泵浦光束经过另一直角棱镜反射后,第三次进入晶体,未被吸收的泵浦光通过晶体后端面反射,最终实现四通^[14]泵浦,理论上计算了晶体对泵浦光的吸收效率为84%,实验中实际测得吸收效率约为81%。Yb:YAG晶体中Yb³⁺离子掺杂浓度为10%,厚度为500 μm,

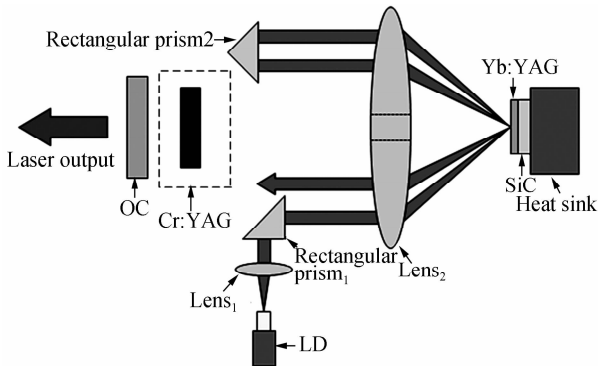


图3 LD泵浦的Cr⁴⁺:YAG被动调Q Yb:YAG薄片激光器实验装置
Fig. 3 Schematic diagram of diode-pumped Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched Yb:YAG thin disk laser

前端面镀有940 nm和1030 nm的增透膜,后端面镀有940 nm和1030 nm的全反膜。激光谐振腔由Yb:YAG晶体的后端面和输出耦合镜组成。

2.1 连续激光实验研究

在不加入调Q晶体Cr⁴⁺:YAG的条件下,实验研究了直接水冷和厚度为800 μm的SiC冷却两种散热方式的连续激光输出特性。为了提高激光输出功率,使用透过率T=5%的平面镜作为输出耦合镜,腔长L=15 cm。图4是测得的1030 nm激光功率随吸收泵浦光的变化情况。从图中可以看出,直接水冷情况下,在吸收泵浦功率为19.5 W时,获得最大输出功率为2 W,斜效率为24.3%;而在SiC冷却方式下,获得最大输出功率为2.8 W,相对于直接水冷的方式,输出功率提高了40%,斜效率为30.1%。使用红外热像仪观测吸收泵浦功率19.5 W时两种冷却方式下的晶体表面最高温度,分别为60℃和38℃,这与前面的模拟计算结

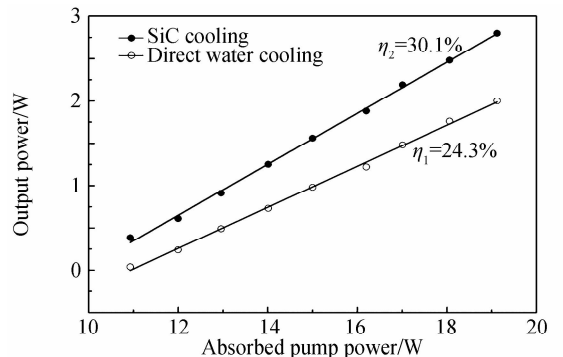


图4 连续激光输出功率随吸收泵浦功率的变化关系
Fig. 4 Dependence of the output power on the absorbed pump power under the CW operation

果基本吻合.

2.2 被动调 Q 实验研究

根据模拟与实验结果,采用厚度为 $800\ \mu\text{m}$ 的 SiC 冷却方式进行调 Q 实验. 为了提高被动调 Q 激光器的输出特性,可以通过优化 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的初始透过率和输出耦合镜来实现. 根据 Degnan^[15] 的理论研究,为了优化 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的初始透过率和输出耦合镜,需要计算激光器谐振腔内的增益与损耗. 根据 Findlay 和 Clay^[16] 的理论分析,通过激光器谐振腔的输出耦合镜反射率和泵浦阈值功率可以得到谐振腔损耗.

$$-\ln R = 2KP_{\text{th}} - L \quad (4)$$

式中 R 为输出镜的反射率, P_{th} 为阈值泵浦功率, L 是腔内往返损耗. 又根据增益与输入功率的关系,可以得到激光器的增益为

$$\ln G_0 = g_0 l = KP_{\text{in}} \quad (5)$$

式中 G_0 为激光器的增益, l 为薄片介质厚度, g_0 为小信号增益系数, P_{in} 为输入功率.

对于给定增益 G_0 的条件下,归一化的最佳 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的初始透过率 T_0 和输出耦合镜的反射率 R 的表达式如式(6)

$$\begin{cases} x = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \\ y = \frac{-\ln T_0}{\ln G_0} \\ z = \frac{\ln G_0^2}{L} \end{cases} \quad (6)$$

对于被动调 Q $\text{Yb}:\text{YAG}$ 薄片激光器,实验分别使用了反射率为 95% 和 90% 的平面输出耦合镜,测得阈值泵浦功率分别为 21.1 W 和 24 W,代入式(4)求得 $K=0.00975$, $L=0.36$. 当泵浦功率为 32 W 时, $G_0=1.366$,代入式(6)可以得到最佳的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 初始透过率和输出耦合透过率分别为 93.37% 和 11.84%.

根据理论计算结果,调 Q 实验中采用初始透过率为 93% 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为调 Q 晶体,透过率 10% 的平面镜作为输出耦合镜. 实验在室温下进行,实验采用德国罗德与施瓦茨公司的 RT01014 型数字示波器测量调 Q 脉冲波形,使用 Ophir Novo 50 A 型功率计测量激光输出的平均功率.

在被动调 Q 实验中,分别测量了不同吸收泵浦功率下被动调 Q $\text{Yb}:\text{YAG}$ 薄片激光器的输出特性,输出平均功率、脉冲能量、重复频率和脉冲宽度随吸收泵浦功率的变化规律如图 5 和图 6 所示. 由图 5 可以看出,被动调 Q 激光器的平均输出功率随着吸收泵浦功率的增大而增大,当吸收泵浦功率为 26 W (泵浦功率为 32 W) 时,激光器最大输出激光平均功率为 1.95 W; 脉冲能量是平均输出功率和重复频率(如图 6 所示)的比

值,它随吸收泵浦功率的增大而变化平缓,变化范围在 $1\sim 1.2\ \text{mJ}$,当调 Q 晶体完全漂白时,脉冲能量保持不变^[17]. 激光器的斜效率为 18.1%.

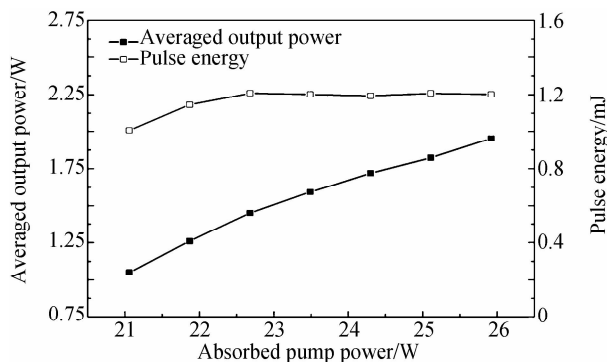


图 5 输出激光平均功率和脉冲能量随吸收泵浦功率变化
Fig. 5 The average output power and pulse energy as a function of the absorbed pump power

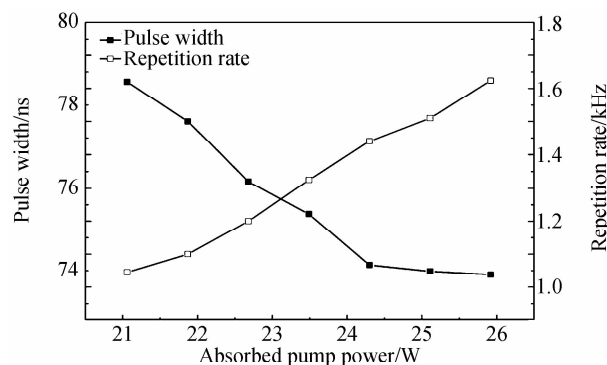


图 6 脉冲宽度和重复频率随吸收泵浦功率变化
Fig. 6 The pulse width and repetition rate as a function of the absorbed pump power

图 6 给出了脉冲重复频率和脉冲宽度随吸收泵浦功率变化的关系. 脉冲重复频率随着吸收泵浦功率的增大而增加,而脉冲宽度随着吸收泵浦功率的增大而减小. 这是由于随着吸收泵浦功率的增大,被动 Q 开关打开前激光晶体 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 中的反转粒子数密度增长速度变大,腔内光子数密度增长速度也变快,被动调 Q 晶体两次被“漂白”的时间间隔缩短,因此被动调 Q 激光器的脉冲重复频率变高;同时由于腔内净增益系数变大,腔内光子数增长及反转粒子数衰减更加迅速,脉冲建立及熄灭过程变短,脉冲宽度变窄. 在吸收泵浦功率为 26 W 时,得到最大重复频率为 1.6 kHz; 在吸收泵浦功率达到 24 W 时,脉冲宽度基本保持不变,此时脉冲宽度基本维持在 74 ns.

图 7 为吸收泵浦功率 26 W 时示波器上观察到的脉冲序列和单脉冲波形,输出激光重复频率为 1.6 kHz,脉冲宽度为 74 ns. 通过 M2-200S 光束质量诊断仪测得激光脉冲的光束质量因子 $M_x^2=1.622$, $M_y^2=1.616$,激光光斑对称性良好.

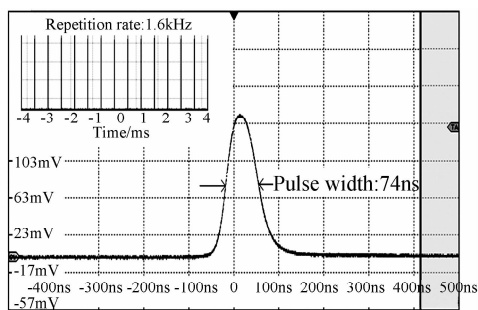


图7 激光器输出波形

Fig. 7 The output Q-switched pulse trace

3 结论

本文设计了一种SiC冷却的被动调Q Yb:YAG薄片激光器,模拟计算了直接水冷方式和不同厚度SiC冷却方式下的薄片温度,实验研究了直接水冷和800 μm SiC冷却两种散热方式下的连续激光输出特性,证实了SiC冷却方式可以提高激光器输出功率.通过对 Cr^{4+} :YAG晶体初始透过率和输出耦合镜进行理论优化,采用800 μm SiC晶体对Yb:YAG薄片进行冷却,获得了平均输出功率1.95 W、单脉冲能量1.2 mJ、脉冲宽度74 ns、重复频率1.6 kHz的稳定1030 nm激光脉冲输出,斜效率为18.1%.

参考文献

- [1] HIROSHI S, HIROHUMI K, TAKUNORI T. >1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd^{3+} :YAG microchip laser[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(24):19891-19899.
- [2] RAKESH B, TAKUNORI T. > 6 MW peak power at 532 nm from passively Q-switched Nd:YAG/ Cr^{4+} :YAG microchip laser[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(20):19135-19141.
- [3] SU Yan-li, LUO Xu, ZHANG Xue-hui, et al. Repetition rate continuously tunable microchip laser passively Q-switched by Cr^{4+} :YAG[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(2):355-359.
苏艳丽,罗旭,张学辉,等.重复频率连续可调谐的 Cr^{4+} :YAG被动调Q微片激光器[J].红外与激光工程,2014, **43**(2):355-359.
- [4] HANS W, DAVID S. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **3**(1):105-116.
- [5] SUMIDA D, FAN T. Effect of radiation trapping on fluorescence lifetime and emission cross section measurements in solid-state laser media[J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(17):

1343-1345.

- [6] TSUNEKANE M, TAIRA T. High peak power, passively Q-switched Yb:YAG/Cr:YAG micro-lasers[J]. *IEEE Quantum Electron*, 2013, **49**(5):454-461.
- [7] DONG J, REN Y. >1 MW peak power, an efficient Yb:YAG/ Cr^{4+} :YAG composite crystal passively Q-switched laser[J]. *Laser Physics*, 2014, **24**(5):1-4.
- [8] LI Xiao-li, SHI Xiang-chun, SHI Peng, et al. Temperature effect of Yb:YAG thin disk laser crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10):1268-1271.
李小莉,施翔春,石鹏,等. Yb:YAG薄片激光介质的温度效应[J].光学学报,2001,**21**(10):1268-1271.
- [9] GAN An-sheng, LI Long, SHI Peng. Thermal effect of Yb:YAG slice laser by diode laser end-pumped[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4):631-635.
甘安生,李隆,史彭.激光二极管端面泵浦Yb:YAG薄片激光器的热效应[J].光子学报,2008,**37**(4):631-635.
- [10] NEWBURGH G, MICHAEL A, DUBINSKII M. Composite Yb:YAG/SiC-prism thin disk laser[J]. *Optics Express*, 2012, **18**(16):17066-17074.
- [11] ZHUANG W, CHEN Y, SU K, et al. Performance enhancement of sub-nanosecond diode-pumped passively Q-switched Yb:YAG microchip laser with diamond surface cooling[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(20):22602-22608.
- [12] ZHU G, ZHU X, WANG M, et al. Analytical model of thermal effect and optical path difference in end-pumped Yb:YAG thin disk laser[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(29):6756-6764.
- [13] SHANG J, ZHU X, ZHU G. Analytical approach to thermal lensing in end-pumped Yb:YAG thin-disk laser[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(32):6103-6120.
- [14] SONG Qiong-ge, CHENG Guang-hua, BAI Jing, et al. System design and research of Yb:YAG thin disk laser with direct cooling arrangement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10):1014001.
宋琼阁,程光华,白晶,等.直接水冷的Yb:YAG薄片激光器系统设计与实验研究[J].光子学报,2014, **43**(10):1014001.
- [15] JOHN J. DEGNAN. Optimization of passively q-switched lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, **31**(11):1890-1901.
- [16] FINDLAY D, CLAY R. The measurement of internal losses in 4-level lasers[J]. *Physics Letters*, 1966, **20**(3):277-278.
- [17] YANG Lin, HUANG Wei-Ling, QIU Jun-Lin, et al. Influence of energy-transfer upconversion effect on the pulse in diode-pumped Cr:YAG passively Q-switched lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(10):2471-2475.
杨林,黄维玲,丘军林,等. Cr^{4+} :YAG被动调Q激光器中受激粒子上转换效应对脉冲的影响研究[J].物理学报,2003,**52**(10):2471-2475.