

二极管抽运国产 Yb:YAG 陶瓷高功率被动调 Q 激光器

于洋¹ 朱江峰¹ 李江² 高子叶¹ 王军利¹ 谢腾飞² 潘裕柏² 魏志义³

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

²中国科学院上海硅酸盐研究所透明光功能无机材料重点实验室, 上海 200050

³中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室光物理重点实验室, 北京 100190

摘要 报道了激光二极管(LD)抽运的国产 Yb:YAG 陶瓷高功率被动调 Q 激光器。实验中使用半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为调 Q 元件,在 6.3 W 的吸收抽运功率下得到了被动调 Q 激光脉冲输出。调 Q 激光脉冲的最大平均输出功率为 1.24 W,脉冲宽度为 2.93 μs ,重复频率为 31 kHz,单脉冲能量为 40 μJ 。国产 Yb:YAG 陶瓷的连续激光和调 Q 激光的性能研究表明,高质量国产 Yb:YAG 陶瓷在高功率短脉冲固体激光器方面有潜在的应用价值。

关键词 激光器;全固态激光器;被动调 Q 激光;二极管抽运;Yb:YAG 陶瓷

中图分类号 TN 248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1001007

High Power Passively Q-Switched Laser of Diode-Pumped Domestic Yb:YAG Ceramic

Yu Yang¹ Zhu Jiangfeng¹ Li Jiang² Gao Ziyue¹ Wang Junli¹
Xie Tengfei² Pan Yubai² Wei Zhiyi³

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

²Key Laboratory of Transparent and Opto-Functional Advanced Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

³Laboratory of Optical Physics, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract A high power passively Q-switched laser of diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic is reported in this paper. In the experiment, a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is used as the Q-switching component, and the passively Q-switched laser pulse output is obtained under the absorbed pump power of 6.3 W. The maximum average output power of the Q-switched laser pulses is 1.24 W, the pulses' duration is 2.93 μs , the repetition rate is 31 kHz, and the single pulse energy is 40 μJ . By studying the performance of the domestic Yb:YAG ceramics under continuous and Q-switched laser, the potential applications of domestic high-quality Yb:YAG ceramics in high-power short-pulse solid-state lasers are revealed.

Key words lasers; all-solid-state laser; passively Q-switched laser; diode-pump; Yb:YAG ceramic

OCIS codes 140.3480; 140.3540; 140.3580

1 引言

20 世纪 90 年代以来,激光二极管(LD)的制作工艺越来越成熟,激光二极管的高性能、低成本、高功率

收稿日期: 2016-04-13; 收到修改稿日期: 2016-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(61205130,50990301)、科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ120047)

作者简介: 于洋(1991—),女,硕士研究生,主要从事全固态飞秒激光器方面的研究。

E-mail: yuyang3640@foxmail.com

导师简介: 朱江峰(1980—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事超短激光脉冲技术及应用方面的研究。

E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn(通信联系人)

和集成化等一系列优点使其成为固体激光器理想的抽运源。激光二极管抽运的固体激光器具有性能稳定、结构紧凑、光束质量好、效率高等优点,在机械加工、医疗、光学信息存储及科研等领域都有非常广泛的应用。由于激光二极管发射激光的光谱波段覆盖了 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 等激活离子的吸收峰,因此 Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 掺杂的激光介质得到了广泛的研究,如 $\text{Nd}:\text{YAG}^{[1]}$ 、 $\text{Nd}:\text{LuAG}^{[2]}$ 、 $\text{Nd}:\text{YVO}_4^{[3]}$ 、 $\text{Nd}:\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3^{[4]}$ 、 $\text{Yb}:\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}^{[5]}$ 、 $\text{Yb}:\text{GdYSiO}_5^{[6]}$ 、 $\text{Yb}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2^{[7]}$ 、 $\text{Yb}:\text{CaF}_2^{[8]}$ 以及 $\text{Yb}:\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3^{[9]}$ 等。相较于 Nd^{3+} 掺杂的激光介质, Yb^{3+} 掺杂的激光介质因其具有能级结构简单、吸收/发射谱宽、上能级寿命长、无交叉弛豫、无能量上转换、无浓度淬灭效应等特性使得 Yb^{3+} 掺杂激光介质被广泛应用于激光二极管抽运固体激光器的研究中。在这些 Yb^{3+} 掺杂激光介质中, $\text{Yb}:\text{YAG}$ 因其优异的机械性能、光谱性能、热力学和光学性能受到了人们的青睐,成为高功率激光器及超短脉冲激光器中最常使用的激光增益介质之一^[10-13]。但是, $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光晶体的生长周期较长、尺寸较小、掺杂浓度低、成本高等缺点限制了其在高功率激光器方面的发展。相比于 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体,近年来广泛研究的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 透明激光陶瓷在热导率、光学均匀性、光学性质等方面与 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 单晶已可比拟,甚至某些参数优于单晶。此外,相比于晶体生长,激光陶瓷的制备具有一系列天然的优势,如掺杂浓度高、制备工艺简单、成本低廉、制备周期短、可以实现量产及制作复合结构等。因此在许多激光器中 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷已经成为 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 单晶的优良替代品,并且在大功率激光输出方面有望全面超越 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体。

2003年,日本电气通信大学^[14]利用原子数分数为1%掺杂的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 激光陶瓷首次得到了345 mW连续激光的输出。自此,人们相继研究了不同掺杂浓度 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷的连续、调Q和锁模激光性能。2006年,日本电气通信大学的 Dong 等^[15]第一次使用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 在 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷中得到了调Q脉冲,脉冲宽度为380 ps,单脉冲能量为31.3 μJ ,重复频率为12.4 kHz,最大平均输出功率为388 mW。2007年,Dong 等^[16-18]又使用 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 和 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的复合陶瓷分别得到了335 ps、1.2 ns和237 ps的调Q脉冲输出,单脉冲能量分别为51.3、125、172 μJ ,最大平均功率分别为256、480、610 mW。2008年,日本茨城大学 Nakamura 等^[19]使用掺杂原子数分数为9.8%的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷获得了6.8 W的连续激光输出,斜效率达到了72%。2009年,日本茨城大学 Yoshioka 等^[20]使用半导体可饱和吸收镜(SESAM)启动和稳定锁模,在掺杂原子数分数为9.8%的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷中实现了被动锁模,获得了脉冲宽度为233 fs的激光脉冲,但是平均功率只有20 mW。国外课题组就 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷激光器进行探索性研究的同时,国内相关课题组也在 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷制备以及 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷激光器研究方面做了很多工作。2008年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Cai 等^[21]使用 $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{YAG}$ 复合陶瓷得到了脉冲宽度为166 ns的调Q激光脉冲,重复频率为30 kHz,最大平均输出功率为440 mW。2010年,中国科学院物理研究所 Zhou 等^[22]实现了激光二极管抽运的高效率 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 飞秒激光器,获得了平均输出功率为1.9 W、脉冲宽度为418 fs的锁模激光。2015年, Bai 等^[23]在掺杂原子数分数为10%的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷中获得了平均功率为7.01 W的连续激光,斜效率为60.2%。2016年,利用克尔透镜锁模技术, Gao 等^[24]使用 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷实现了97 fs的超短脉冲输出,平均功率为320 mW。

本文研究了激光二极管抽运的国产 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷被动调Q激光器。实验中使用掺杂原子分数为15%、通光长度为3 mm的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷作为增益介质,SESAM作为被动调Q元件,得到了稳定的调Q激光输出。当抽运激光功率为8 W(吸收的抽运功率为6.3 W)时,调Q激光脉冲的最大平均输出功率为1.24 W,脉冲宽度为2.93 μs ,单脉冲能量为40 μJ ,重复频率为31 kHz。

2 实验装置

实验中使用的激光介质是由中国科学院上海硅酸盐研究所制备的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 透明陶瓷。 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷采用固相反应和真空烧结技术制备,主要原料为高纯度 Yb_2O_3 、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 Y_2O_3 氧化物粉末(Alfa Aesra, USA),按照分子式 $[\text{Yb}_{3-x}\text{Y}_{3(1-x)}\text{Al}_5\text{O}_{12}]$ 的摩尔分数称量粉体,使用氧化镁和正硅酸乙酯(TEOS)作为烧结助剂,经过球磨、出料、烘干、过筛、预处理、成型、真空烧结、退火等工艺,最后对样品抛光后得到高品质的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 透明陶瓷。实验中使用的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 陶瓷中 Yb^{3+} 离子掺杂原子数分数为15%,陶瓷通光截面尺寸为5 mm \times 5 mm,通光长度为3 mm。

为了使 Yb:YAG 陶瓷有效散热以降低其内部的热效应,实验中将其用钢箔包裹并固定在紫铜水冷热沉上,采用主动控制方式将水冷热沉温度稳定在 16 °C 左右。实验采用端面抽运方式,抽运源为发射波长在 970 nm 附近的光纤耦合输出半导体激光器,最大额定输出功率为 30 W,耦合输出光纤的芯径为 105 μm,数值孔径为 0.22。光纤输出的抽运光束采用 1:1 的耦合聚焦透镜聚焦在 Yb:YAG 陶瓷中心。

激光二极管抽运的国产 Yb:YAG 陶瓷被动调 Q 实验装置如图1所示。输入镜 M1 是平面双色镜,表面镀有增透膜(AR,800~1000 nm)和高反膜(HR,1020~1200 nm)。M2、M3 和 M4 分别为曲率半径为 200、200、300 mm 的凹面镜,表面均镀有高反膜(940~1200 nm)。其中凹面镜 M4 的作用是将腔内激光光束聚焦在 SESAM 上以提高激光功率密度,从而使可饱和吸收体达到饱和。实验中使用的 SESAM 的中心波长为 1040 nm,调制深度为 0.4%,非饱和损失为 0.3%,恢复时间为 1 ps。图 1 中 OC 为耦合输出镜。

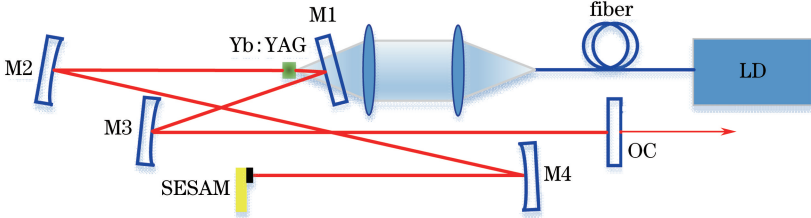


图 1 二极管抽运国产 Yb:YAG 陶瓷被动调 Q 激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental schematic of the diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic passively Q-switched laser

3 实验结果与分析

实验首先测试了 Yb:YAG 陶瓷对抽运光的吸收率,使用三镜折叠腔得到了高效率的连续激光输出,并在腔内插入 SF6 三棱镜实现了连续波长调谐。Yb:YAG 陶瓷的吸收抽运功率随入射抽运功率的变化曲线如图2(a)所示,可以看到吸收抽运功率与入射抽运功率呈线性关系,单次通过吸收率(η_{slope})约为 78.9%。使用 2.5% 和 10% 透射率的耦合输出镜对 Yb:YAG 陶瓷进行了连续激光实验,其输出功率曲线如图 2(b) 所示。使用透射率(T)为 10% 的耦合输出镜,在 6.3 W 的吸收抽运功率(入射抽运功率为 8 W)下得到的最大连续激光输出功率为 2.4 W,对应的斜效率为 46.7%。从图 2(b)中可以看出,在 8 W 的抽运功率下,两组输出功率都没有出现饱和现象,但是为了避免更高的入射功率破坏陶瓷,实验中没有继续增加抽运功率。在此基础上在腔内插入以布儒斯特角切割的 SF6 三棱镜进行了连续激光调谐实验。实验中使用透射率为 0.8% 和 2.5% 的耦合输出镜分别研究了 Yb:YAG 陶瓷的波长调谐性质,连续激光波长调谐曲线如图 2(c) 所示,其中使用 0.8% 透射率的耦合输出镜得到的波长调谐曲线宽而平坦,波长调谐范围覆盖了 1017~1095 nm 波段,有利于实现超短脉冲锁模运转。从图 2(c)的调谐曲线可以看出输出波长可以大于 1095 nm,但是受限于光谱仪的测量范围,1095 nm 之后的光谱未能测量。

使用 ABCD 传输矩阵模拟腔内激光束腰的演化过程,理论计算得到陶瓷中心处激光光斑直径约为 100 μm,与抽运光束直径接近,实现了良好的模式匹配,有利于实现高效率激光运转。实验中采取了以下措

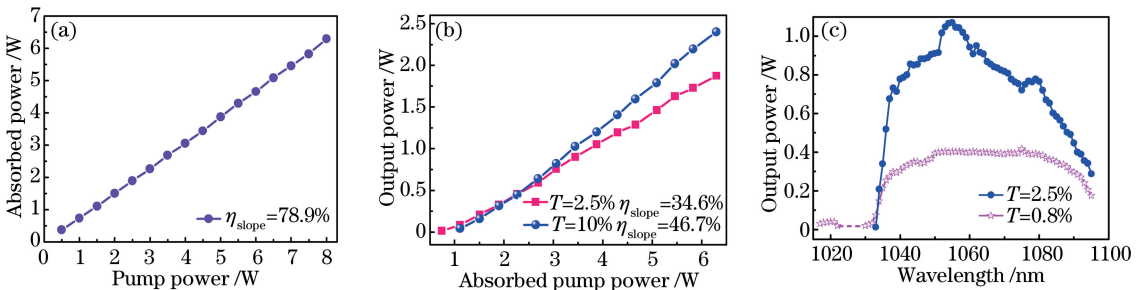


图 2 国产 Yb:YAG 陶瓷的(a)抽运激光吸收功率曲线;(b)连续激光输出功率曲线;(c)连续激光波长调谐曲线

Fig. 2 (a) Absorbed pump laser power curve; (b) continuous wave laser output power curves;

(c) continuous wave laser tuning curves of domestic Yb:YAG ceramic

施提高激光输出功率:首先,选取曲率半径为 200 mm 的凹面镜 M2 和 M3 作为共聚焦腔镜,使激光陶瓷内的激光模式和半导体激光器的聚焦激光模式相匹配;其次,实验中使用非饱和损耗较小的 SESAM 作为可饱和吸收介质,减少因非饱和吸收所导致的功率损失;再次,使用透射率为 10% 的耦合输出镜作为输出镜,实现最大的输出激光功率。

当抽运激光功率达到 3 W 时,通过示波器可以观察到调 Q 序列;当抽运功率增加至 8 W 时,可以得到稳定的调 Q 脉冲序列。Yb:YAG 陶瓷被动调 Q 激光器的输出激光功率和吸收抽运功率的关系曲线如图 3 所示,可以看到,在 6.3 W 的吸收抽运功率下得到了 1.24 W 的调 Q 输出功率。使用高速光电二极管和示波器来检测和记录调 Q 激光的脉冲序列,如图 4(a)所示。被动调 Q 脉冲的重复频率为 31 kHz,对应的单脉冲能量为 40 μ J。调 Q 激光的脉冲宽度曲线如图 4(b)所示,脉冲宽度为 2.93 μ s。调 Q 激光的光谱如图 5 所示,其中心波长在 1050 nm 附近。实验观察并记录了调 Q 脉冲的波形及平均输出功率的稳定性,在室温为 22 $^{\circ}$ C、空气湿度为 30%、水冷为 16 $^{\circ}$ C 的条件下,调 Q 脉冲激光器可以稳定运转 3 h 以上,平均输出功率波动小于 1%。

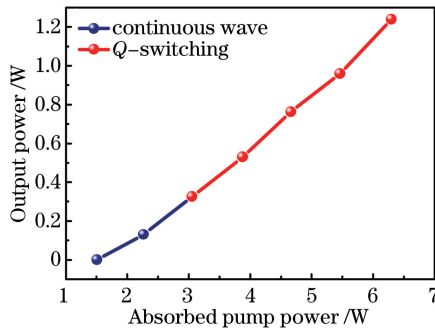


图 3 二极管抽运国产 Yb:YAG 陶瓷被动调 Q 激光器的输出功率曲线

Fig. 3 Output power curve of the diode-pumped passively Q-switched domestic Yb:YAG ceramic laser

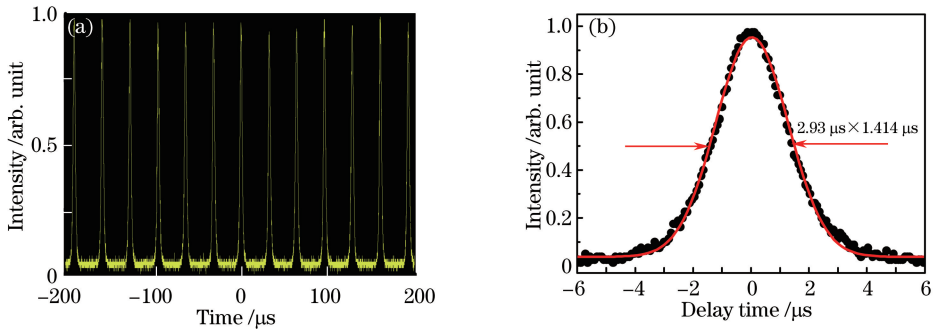


图 4 二极管抽运国产 Yb:YAG 陶瓷被动调 Q 激光器的 (a) 脉冲序列和 (b) 脉冲轮廓

Fig. 4 (a) Pulse series and (b) pulse profile of the diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic passively Q-switched laser

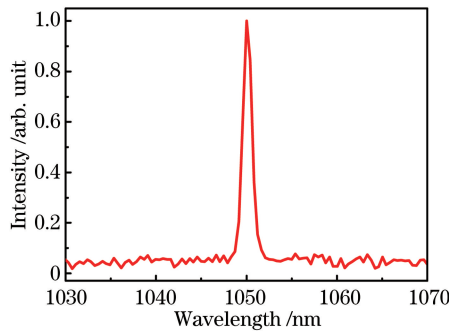


图 5 二极管抽运国产 Yb:YAG 陶瓷被动调 Q 激光器的光谱

Fig. 5 Spectrum of the diode-pumped domestic Yb:YAG ceramic passively Q-switched laser

4 结 论

实验研究了国产 Yb:YAG 陶瓷的连续激光和被动调 Q 输出特性。使用光纤耦合输出半导体激光器作为抽运源,在吸收抽运功率为 6.3 W 时,得到了 2.4 W 的连续激光输出,其斜效率为 47%。15%(原子分数)掺杂的 Yb:YAG 陶瓷的波长调谐范围可达 1017~1095 nm。采用 SESAM 作为调 Q 元件,获得了最大输出功率为 1.24 W 的被动调 Q 激光,脉冲宽度为 2.93 μs ,重复频率为 31 kHz,对应的单脉冲能量为 40 μJ ,中心波长为 1050 nm。本实验初步证明高品质国产 Yb:YAG 激光陶瓷可用于高功率脉冲激光器,其宽波长调谐特性为实现大功率锁模超短激光脉冲提供了参考。

参 考 文 献

- Gao J C, Speiser J, Giesen A. 25 W diode-pumped continuous-wave quasi-three-level Nd:YAG thin disk laser [J]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2005: 593-597.
- Ye Y L, Zhu H Y, Duan Y M, *et al.* Continuous-wave laser operation of Nd:LuAG ceramic with $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ transition [J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(3): 611-616.
- Li X D, Yu X, Chen F, *et al.* Comparison on performance of acousto-optically Q-switched Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄ lasers at high repetition rates under direct diode pumping of the emitting level [J]. *Optics Express*, 2009, 17(11): 9468-9476.
- Ren Y Y, Dong N N, Jia Y C, *et al.* Efficient laser emissions at 1.06 μm of swift heavy ion irradiated Nd:YCOB waveguides [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4521-4523.
- Zhang Y D, Wei Z Y, Zhou B B, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Yb:Y₃Ga₅O₁₂ laser [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3316-3318.
- Zhou B B, Wei Z Y, Zhang Y D, *et al.* Generation of 210 fs laser pulses at 1093 nm by a self-starting mode-locked Yb:GYSO laser [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(1): 31-33.
- Zhao H T, Major A. Powerful 67 fs Kerr-lens mode-locked prism less Yb:KGW oscillator [J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 31846-31851.
- Machinet G, Sevillano P, Guichard F, *et al.* High-brightness fiber laser-pumped 68 fs—2.3 W Kerr-lens mode-locked Yb:CaF₂ oscillator [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 1008-1010.
- Gao Z Y, Zhu J F, Tian W L, *et al.* Generation of 73 fs pulses from a diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb:YCa₄O(BO₃)₃ laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5870-5872.
- Tsunekane M, Taira T. 300 W continuous-wave operation of a diode edge-pumped, hybrid composite Yb:YAG microchip laser [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(13): 2003-2005.
- Liu Q, Gong M L, Lu F Y, *et al.* Corner-pumped Yb: yttrium aluminum garnet slab laser emitted up to 1 kW [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(10): 101113.
- Uemura S, Torizuka K. Center-wavelength-shifted passively mode-locked diode-pumped ytterbium: yttrium aluminum garnet (YAG) laser [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(12): L361-L363.
- Uemura S, Torizuka K. Sub-40 fs pulses from a diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb-doped yttrium aluminum garnet laser [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(1R): 010201.
- Takaichi K, Yagi H, Lu J, *et al.* Yb³⁺-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramics a new solid-state laser material [J]. *Physica Status Solidi A*, 2003, 200(1): R5-R7.
- Dong J, Shirakawa A, Takaichi K, *et al.* All-ceramic passively Q-switched Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(20): 1154-1155.
- Dong J, Shirakawa A, Ueda K, *et al.* Near-diffraction-limited passively Q-switched Yb:Y₃Al₅O₁₂ ceramic lasers with peak power ≥ 150 kW [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(13): 131105.
- Dong J, Shirakawa A, Ueda K, *et al.* Ytterbium and chromium doped composite Y₃Al₅O₁₂ ceramics self-Q-switched laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(19): 191106.
- Dong J, Ueda K, Shirakawa A, *et al.* Composite Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG ceramics picosecond microchip lasers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14516-14523.
- Nakamura S, Yoshioka H, Yu M, *et al.* Efficient tunable Yb:YAG ceramic laser [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(17): 4411-4414.
- Yoshioka H, Nakamura S, Ogawa T, *et al.* Diode-pumped mode-locked Yb:YAG ceramic laser [J]. *Optics Express*,

2009, 17(11): 8919-8925.

- 21 Cai H, Zhou J, Zhao H M, *et al.* Continuous-wave and Q-switched performance of an Yb:YAG/YAG composite thin disk ceramic laser pumped with 970 nm laser diode[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(11): 852-854.
- 22 Zhou B B, Wei Z Y, Zou Y W, *et al.* High-efficiency diode-pumped femtosecond Yb:YAG ceramic laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(3): 288-290.
- 23 Bai D B, Li W X, Yang X H, *et al.* Continuous-wave laser performance of non-aqueous tape casting fabricated Yb:YAG ceramics[J]. Optical Materials Express, 2015, 5(2): 330-339.
- 24 Gao Z Y, Zhu J F, Wang K, *et al.* Diode-pumped Kerr-lens mode-locked femtosecond Yb:YAG ceramic laser[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(2): 024205.