

文章编号: 1001-2486(2011)02-0016-04

## 闪灯泵浦国产 Nd:YAG 陶瓷调 Q 激光器\*

李 霄<sup>1</sup>, 杨子宁<sup>1</sup>, 刘亮<sup>1</sup>, 郭少锋<sup>1</sup>, 许晓军<sup>1</sup>, 赵伊君<sup>1</sup>, 刘文斌<sup>2</sup>, 姜本学<sup>2</sup>, 潘裕柏<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

**摘要:**陶瓷激光器在高掺杂、大尺寸和复合结构设计等方面有着特殊的优势,具备实现高能、高光束质量激光器的潜力。研究了上海硅酸盐所提供的新型国产 Nd:YAG 陶瓷激光材料的激光输出性能,对比了陶瓷激光棒与单晶激光棒的储能特性,通过主动和被动调 Q 两种方法分别实现了闪灯泵浦陶瓷脉冲激光器,获得了重频 1~20Hz 可调,单脉冲百毫焦量级的输出,峰值功率近 10MW。验证了陶瓷激光介质在激光领域的应用,对大能量、短脉冲陶瓷激光器进行了初步的探索和研究。

**关键词:**固体激光器;陶瓷激光器;灯泵;调 Q

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Flash Lump Pumped Q-switched Domestic Nd:YAG Ceramic Laser

LI Xiao<sup>1</sup>, YANG Zi-ning<sup>1</sup>, LIU Liang<sup>1</sup>, GUO Shao-feng<sup>1</sup>, XU Xiao-jun<sup>1</sup>, ZHAO Yi-jun<sup>1</sup>, LIU Wen-bing<sup>2</sup>, JIANG Ben-xue<sup>2</sup>, PAN Yu-bo<sup>2</sup>

(1. College of Opto-electric Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** Ceramic laser, possessing the advantage of polycrystalline inhesion, has the potential to be high-energy and high-light beam quality laser. The current study researched into the performance of domestic Nd:YAG ceramic created by Shanghai institute of ceramics and realized the actively and passively Q-switched ceramic laser side-pumped by flash lamps. The average pulse energy could be above 100mJ and the repeat rate is up to 20Hz. The peak power reaches nearly 10 MW. The research result in the confirmation of ceramic laser in the field of high-energy laser, and a probe in the short pulse ceramic laser with high energy.

**Key words:** solid laser; ceramic laser; flash lamp pump; Q-switched

透明激光陶瓷材料的多晶结构使其在高掺杂浓度、大尺寸生长、多功能复合结构等方面<sup>[1-3]</sup>有着单晶无法比拟的优势,其生长周期短、产量高<sup>[4-6]</sup>等特点又大大降低了成本。因而,自 1995 年问世以来<sup>[7-8]</sup>,陶瓷激光器受到了广泛的关注和研究,获得了飞速发展<sup>[9-10]</sup>。2006 年,美国利弗莫尔国家实验室报道了采用热容模式工作的 67kW 陶瓷 Nd:YAG 激光器<sup>[11]</sup>,是迄今为止公开报道的最高功率陶瓷激光器。国内对陶瓷激光器的研究也有一定进展<sup>[12-13]</sup>,2005 年,上海光机所采用进口 Nd:YAG 陶瓷激光材料实现了高达 62% 的斜效率输出<sup>[14]</sup>,至今仍处于国际领先水平。

近年来,中国科学院上海硅酸盐所相继制备了较高质量的 Nd:YAG 和 Yb:YAG 多晶透明陶瓷并获得了良好效果<sup>[15]</sup>,实验大多采用激光二极管

泵浦,本文采用闪灯泵浦的方式对国产激光陶瓷材料进行了研究,通过电光调 Q 和 SBS 自调 Q 方式分别实现了主动和被动调 Q 脉冲激光器,获得了重复频率 1~20Hz 可调,单脉冲能量在百 mJ 量级,峰值功率近 10MW 的脉冲激光输出,测试了国产陶瓷激光介质性能,对其在激光领域的应用进行了初步的研究。

### 1 国产透明陶瓷的激光输出特性

与激光二极管相比,闪光灯谱线复杂,转换效率较低,对激光介质的吸收特性要求也更高。然而闪灯泵浦 Nd:YAG 激光技术有着数十年的历史,已经发展得较为成熟,特别是在大能量脉冲激光领域,有一定的成本与技术优势。为综合对比国产陶瓷和单晶材料性能,本文首先采用直腔结构激光器,分别对 1% 掺杂的单晶激光棒和 0.8%

\* 收稿日期:2010-11-05

基金项目:国家“863”高技术计划资助项目(2007AA03Z523);国家自然科学基金重大资助项目(50990301);湖南省研究生科研创新资助项目(CX2009B006);国防科技大学研究生科研创新资助项目(B090704)

作者简介:李霄(1983—),男,博士生。

掺杂的陶瓷激光棒进行了出光实验。

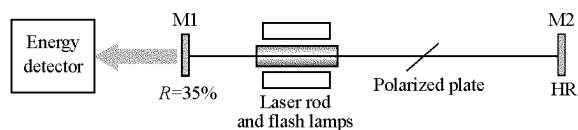


图 1 激光器示意图

Fig.1 Schematic of the laser cavity

实验装置如图 1 所示,激光棒尺寸均为  $\Phi 6\text{mm} \times 100\text{mm}$ ,由两支闪光灯侧面泵浦,棒与闪光灯均封装于镀金高反泵浦腔内以实现均匀泵浦。谐振腔长度约 1m,由 1064nm 高反镜(M2)和反射率为 35%的输出镜(M1)组成,激光器内可插入布儒斯特片起偏。为准确测量单脉冲能量,实验采用外触发方式测量不同泵浦条件下输出的脉冲能量,通过多次测量求平均值的方法进行分析,结果如图 2 所示。

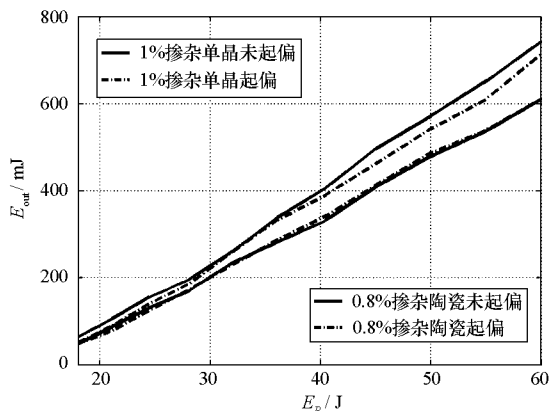


图 2 单晶与陶瓷棒输出能量对比

Fig.2 Energy of the ceramic laser and single crystal laser

如图 2 所示,腔内插入起偏元件没有导致输出能量明显下降,主要原因是激光重复频率较低,热效应影响较小。在出光性能方面,陶瓷棒(0.8%掺杂)的斜率效率约为单晶棒(1%掺杂)的 85%,根据文献[16],斜率效率  $\sigma_s$  正比于吸收效率  $\eta_a$ ,

$$\eta_a = 2\alpha_{av} R \exp(-\alpha_{av} R) \quad (1)$$

式(1)中, $R$ 为激光棒半径, $\alpha_{av}$ 为泵浦光谱分布范围内平均吸收系数,与掺杂浓度成正比,与图 2 所示曲线吻合,因此可以认为,所用国产激光陶瓷储能水平已经接近单晶。实验虽然获得了近 600mJ 的单脉冲能量,但由于脉冲宽度在 ms 量级,峰值功率仅近千瓦,不足以体现介质在高能激光领域的应用潜力,为进一步探索材料的耐强光特性,本文采用主动和被动调 Q 方式进行了陶瓷脉冲激光器的研究。

## 2 电光调 Q 实验

主动调 Q 脉冲采用电光调 Q 方式实现,在图 1 所示腔内插入电光晶体和  $\lambda/4$  波片,形成调 Q 开关,输出镜改用一面变反射率镜(VRM)以提高光束质量。由于电光晶体直径约 3mm,形成光阑,造成了激光输出功率的下降。

实验采用 Thorlabs 公司 DET 210 型 Si 探测器和 Tektronix 公司 TDS 7154 型示波器对激光脉冲波形进行触发测量。微调腔体,在最大输入能量为 50J 时,获得了如图 3 所示,脉冲宽度约 20ns,重复频率 1~20Hz 可调,平均脉冲能量约 183mJ 的激光输出。

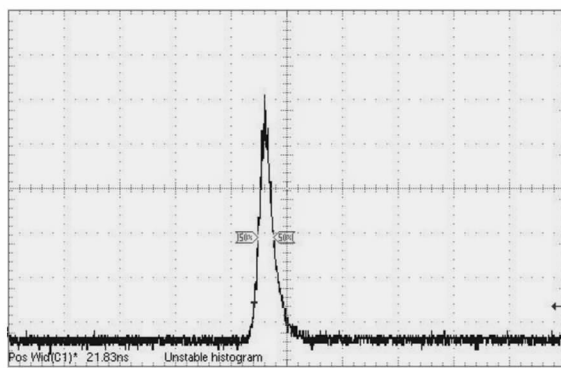


图 3 电光调 Q 激光波形(181mJ)

Fig.3 EO Q-switched pulse profiles (181mJ)

## 3 SBS 调 Q 实验

闪灯泵浦的 SBS(受激布里渊)自调 Q 激光器是一种利用 SBS 现象产生脉冲的被动调 Q 激光器,可以直接实现百毫焦量级的纳秒甚至皮秒脉冲输出<sup>[17]</sup>,峰值功率高,同时腔内存在相位共轭镜(PCM)作用,光束质量和稳定性优于普通的吸收体被动调 Q 激光器<sup>[21]</sup>。至今还没有调研到陶瓷激光介质用于此类技术的报道,国内外主要关注于陶瓷激光介质用于连续波锁模产生超短脉冲的研究<sup>[19]</sup>。连续波锁模是实现超短脉冲的有效途径,然而其重复频率高,单脉冲能量较小(亚 mJ 量级),因而峰值功率较低,需外加放大器才能实现高峰值功率脉冲输出<sup>[20]</sup>。

本文采用 SBS 自调 Q 结构进行实验,可以直接产生百毫焦,纳秒量级的短脉冲输出,验证了陶瓷激光器在大能量脉冲激光器领域的应用价值。

实验结构如图 4 所示混合腔<sup>[21]</sup>,SBS 介质为 FC72 液体<sup>[22]</sup>,封装于镀有增透膜的玻璃池中,短焦透镜 lens1 和 lens2 组成望远镜系统,焦点位于 SBS 池正中。低反射率镜 M1 和 M2 组成高损耗

的启动腔,当腔内激光振荡达到一定强度后,池内介质出现受激布里渊现象,形成稳定声波场,等效于反射率可达 90% 以上的相位共轭镜(PCM),PCM 代替 M2 与 M1 组成损耗较低的新腔体,在这一过程中激光器 Q 值突变,产生脉冲输出。要获得稳定的 SBS 现象,振荡腔长度需满足<sup>[23]</sup>:

$$\begin{cases} m(c/2L_{start}) = \nu_B \\ n(c/2L_{SBS}) = \nu_B \end{cases}$$

式中  $L_{start}$ 、 $L_{SBS}$  分别为起始腔和 SBS 腔长度,  $\nu_B$  为介质的布里渊频移(FC72 约 270MHz)<sup>[24]</sup>。  $n$ 、 $m$  为正整数,一般取  $m = 2$ ,  $n = 1$ ,然而根据文献[18]观测, $m$ 、 $n$  严格取整时 SBS 效果并不一定最佳,因此实验中取  $L_{start} = 111\text{cm}$ ,  $L_{SBS} = 105\text{cm}$ ,即  $m = 2$ ,  $n \approx 2$ 。

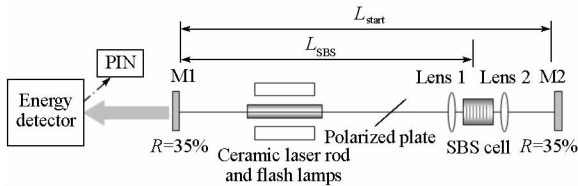


图 4 SBS 自调 Q 腔示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the laser system

实验仍然采用前述光电探测系统检测脉冲,当泵浦功率低于 40J 时,产生的激光单脉冲能量低于 50mJ 且无调 Q 脉冲产生。当泵浦能量达到 40J 时,脉冲能量上升至 100mJ 量级,同时探测器被光脉冲信号触发,测得脉冲波形如图 5(a)所示,图 5(a)上半部时间尺度为 200μs/div,可以看出,在 2ms 的泵浦时间内仅有一个脉冲产生,下半部分为该脉冲的放大示意图(40ns/div)。随着泵浦能量增加,单脉冲能量也逐渐上升,在 55J 泵浦时,获得最高单脉冲能量为 171mJ,整个脉冲半峰宽度约 45ns,由一序列 1~2ns 的子脉冲组成,单个子脉冲能量约 28.5mJ,峰值功率约 14MW,然而此时脉冲并不稳定,有时会产生如图 5(b)所示多脉冲现象。多次测量结果表明,系统在泵浦能量为 45J 时能够较为稳定地实现单脉冲能量约 128mJ 短脉冲输出,峰值功率约 10MW。

如图 5(a)、(c)所示,各子脉冲间隔约为 7ns,正好等于腔往返时间,可能产生了部分锁相(锁模)现象,但受限于实验条件,无法对其精确测量,如何使锁模现象更加稳定,以实现大能量超脉冲激光器将是下一步工作的研究重点。

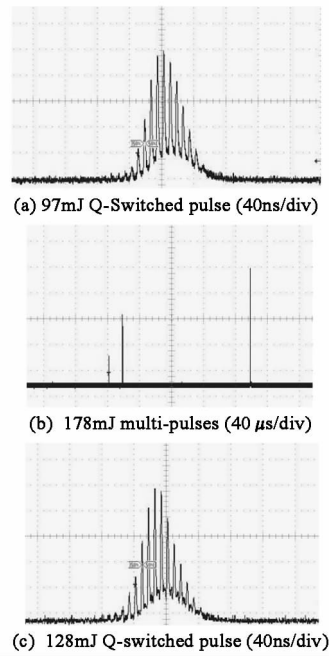


图 5 激光脉冲波形

Fig. 5 The temporal structure of the laser pulse

### 4 结论

本文研究了国产 Nd:YAG 陶瓷在闪灯泵浦条件下的出光性能,并与单晶材料进行了对比,验证了目前国产激光陶瓷储能水平已经接近单晶,在此基础上进行了主动调 Q 和被动调 Q 实验研究,实现了大能量短脉冲输出,对高性能陶瓷激光器进行了初步的探索和研究。

通过电光调 Q 方式,获得了脉冲宽度约 20ns,重复频率 1~20Hz 可调,平均脉冲能量约 183mJ 的稳定脉冲激光输出,峰值功率近 9MW。通过 SBS 自调 Q 方式实现了能量约 125mJ 的稳定纳秒脉冲序列输出,峰值功率约 10MW。说明国产陶瓷激光材料已经具备了一定的实用潜质,验证了其在固体脉冲激光技术领域的的应用价值。

### 参考文献:

- [1] Lupei V. Ceramic Laser Materials and the Prospect for High Power Lasers[J]. Opt Mater, 2009, 31: 701 - 706.
- [2] Kracht D, Freiburg D, Wilhelm R, et al. Core-doped Ceramic Nd: YAG Laser[J]. Opt Express, 2006, 14: 2690 - 2694.
- [3] Sträier A, Ostermeyer M. Improving the Brightness of Side Pumped Power Amplifiers by Using Core Doped Ceramic Rods[J]. Opt Express, 2006, 14: 6687 - 6693.
- [4] Kracht D, Frede M, Wilhelm R, et al. Comparison of Crystalline and Ceramic Composite Nd: YAG for High Power Diode End-pumping[J]. Opt Express, 2005, 13: 6212 - 6216.
- [5] Lu J R, Prabhu M, Xu J Q, et al. Highly efficient 2% Nd: Yttrium Aluminum Garnet Ceramic Laser[J]. Appl Phys Lett,

- 2000, 77: 3707 – 3709.
- [6] Wilhelm R, Freiburg D, Frede M, et al. End-pumped Nd: YAG Laser with a Longitudinal Hyperbolic Dopant Concentration Profile [J]. Opt Express, 2008, 16: 20106 – 20116.
- [7] Ikesue A, Kinoshita T, Kamata K, et al. Fabrication and Optical Properties of High-Performance Polycrystalline Nd: YAG Ceramics for Solid-State Lasers [J]. J. Am. Ceram. Soc., 1995, 78: 1033 – 1040.
- [8] Guo L, Hou W, Zhang H B, et al. Diode-end-pumped Passively Mode-locked Ceramic Nd: YAG Laser with a Semiconductor Saturable Mirror[J]. Opt Express, 2005, 13: 4085 – 4089.
- [9] Kong J, Tang D Y. Passively Q-switched Yb: Y2O3 Ceramic Laser with a GaAs Output Coupler[J]. Opt Express, 2004, 12: 3560 – 3566.
- [10] Wang Z P, Liu H, Wang J Y, et al. Passively Q-switched Dual-wavelength Laser Output of LD-end-pumped Ceramic Nd: YAG Laser [J]. Opt Express, 2009, 17: 12076 – 12081.
- [11] 楼祺洪,漆云凤,周军. 高性能透明激光陶瓷及陶瓷激光器的最新应用进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37: 993 – 997.
- [12] Ji J, Zhu X, Wang C, et al. Comparison of Laser Performance of Electro-optic Q-switched Nd: YAG Ceramic/Single Crystal Laser [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4: 219 – 221.
- [13] 唐昊,朱小磊,姜本学,等. 侧面抽运国产 Nd:YAG 陶瓷棒的激光特性[J]. 中国激光, 2008: 35(12): 2001 – 2004.
- [14] Qi Y F, Zhu X L, Lou Q H, et al. Nd: YAG Ceramic Laser Obtained High Slope-efficiency of 62% in High Power Applications [J]. Opt Express, 2005, 13: 8725 – 8729.
- [15] Hao Q, Li W X, Pan H F, et al. Laser-diode Pumped 40-W Yb: YAG-ceramic Laser [J]. Opt Express, 2009, 17: 17734 – 17738.
- [16] Koecner W. Solid-State Laser Engineering [M]. Springer Express, 2005.
- [17] Eichler H J, Menzel R, Schumann D. 10 W Single Rod Nd: YAG Laser with Stimulated Brillouin Scattering Q-Switching Mirror [J]. Applied Optics, 1992, 31: 5038 – 5043.
- [18] Meng H, Eichler H J. Nd: YAG Laser with a Phase-conjugating Mirror Based on Stimulated Brillouin Scattering in SF6 Gas [J]. Opt Lett, 1991, 16: 569 – 571.
- [19] Yoshioka H, Nakamura S, Ogawa T, et al. Diode-pumped Mode-locked Yb: YAG Ceramic Laser[J]. Opt Express, 2009, 17: 8919 – 8925.
- [20] Kappe P, Ostermeyer M, Menzel R. Active Mode Locking of a Phase-conjugating SBS-laser Oscillator [J]. Applied Physics, 2005, B80: 49 – 54.
- [21] Lamb R A, Damzen M J. Phase Locking of Multiple Stimulated Brillouin Scattering by a Phase-conjugate Laser Resonator [J]. J. Opt.Soc.Am., 1996, B13: 1468 – 1472.
- [22] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, et al. Heavy Fluorocarbon Liquids for a Phase-conjugated Stimulated Brillouin Scattering Mirror [J]. Appl Optics, 1997, 36: 3739 – 3744.
- [23] Ostermeyer M, Mittler K, Menzel K. Q Switch and Longitudinal Modes of a Laser Oscillator with a Stimulated-Brillouin-scattering Mirror[J]. Physical Review, 1999, A59: 3975 – 3985.
- [24] Brignon A, Huignard J P. Phase Conjugate Laser Optics [M]. John Wiley & Sons Inc, 2004.