

文章编号: 1001-3806(2013)03-0326-04

## YAG 陶瓷激光器的研究进展

刘亚东<sup>1</sup>, 姚志健<sup>2\*</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

**摘要:** 激光透明陶瓷具有良好的材料和光学特性, 并且具有较大的制备优势, 是有着较好前景的激光材料。与之相对应, 陶瓷激光器近年来引起了人们的广泛关注。主要综述了国内外 YAG 陶瓷激光器的进展。陶瓷激光器的发展虽然只有短短十几年的时间, 但是发展迅速; 随着制备工艺的进一步发展, 陶瓷激光器将可能有更好的发展前景。

**关键词:** 激光器; 陶瓷激光器; 激光透明陶瓷; Nd:YAG; Yb:YAG

**中图分类号:** TN248.1      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.013

### Progress of YAG ceramic laser

LIU Ya-dong<sup>1</sup>, YAO Zhi-jian<sup>2</sup>

(1. School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Ordnance Science Institute of China, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Laser transparent ceramics has good material properties and optical properties, and has the great advantage of preparation. It's a kind of laser material with good prospects. Correspondingly, transparent ceramic laser has aroused widespread concern in recent years. The progress of the YAG ceramic laser at home and abroad was introduced. Although the history of the YAG ceramic laser is just more than a decade, the YAG ceramic laser develops rapidly; with the further development of the preparation process of the ceramic laser, it may have better development prospects.

**Key words:** lasers; ceramic laser; laser transparent ceramics; Nd:YAG; Yb:YAG

### 引言

全固态激光器以其体积小、效率高、性能稳定等特点已成为当前光电子技术领域的一个研究热点。对于固体激光器来说有 3 种重要的激光介质: 单晶、玻璃和陶瓷。单晶工作物质的激光器体积小, 性能可靠、稳定, 并适用于各种连续和脉冲激光器件。玻璃也是一种重要的激光介质, 它制作工艺比较简单, 可以实现大尺寸及高参杂, 并且玻璃的热致双折射效应低; 玻璃的缺点主要是热导率不够高、硬度不够高、荧光谱线宽较宽和激光振荡阈值较高。近年来又出现另一种激光介质——激光陶瓷。随着制备工艺的进步, 激光陶瓷的形状已经比较容易控制并且可以制备较大尺寸; 激光透明陶瓷制备周期短, 生产成本低, 能够大规模生产, 可掺杂浓度高, 且其热导率

好于玻璃, 但比激光晶体差。

在各种材料中, 石榴石型的晶体和稀土倍半氧化物是制备激光透明陶瓷的主要选择, 目前研究最广泛并且最具有代表性的激光陶瓷材料就是 YAG 和  $Y_2O_3$ 。作者将主要介绍 YAG 激光陶瓷及 YAG 陶瓷激光器的发展状况。

### 1 国外 YAG 陶瓷激光器的研究概况

人们对透明陶瓷材料的研制早在 20 世纪 60 年代就已开始, 而 YAG 陶瓷多晶材料被科学家广泛研究则是在上世纪 80 年代中期。

#### 1.1 Nd:YAG 陶瓷激光器

20 世纪 80 年代, 多晶激光陶瓷成为科学家研究的热点, 研究者们用各种方法制备透明激光陶瓷, 但是限于当时的技术和工艺, 所获得的透明陶瓷其性能与单晶相比还有较大差距。20 世纪 90 年代中期, 制备技术得到很大突破。1995 年 IKESUE 等人<sup>[1]</sup>采用高温固相反应法制备出与 Nd:YAG 单晶物理性能比较接近的高度透明的 Nd:YAG 陶瓷。1998

作者简介: 刘亚东(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光器方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: frank0788@gmail.com

收稿日期: 2012-08-22; 收到修改稿日期: 2012-08-30

年 Konoshima 公司制备的 Nd:YAG 陶瓷在吸收光谱、发射光谱、荧光寿命等方面的性能与单晶十分接近。

此后, Nd:YAG 陶瓷激光器的研制进入一个快速发展期, 激光器的性能也不断提高。日本在陶瓷激光器的研究上, 投入了较多的精力, 所获得的成果也较多。1999 年, 日本冈崎分子科学研究所的 TAI-RA 等人<sup>[2]</sup>用厚度为 847 $\mu\text{m}$  的 Nd:YAG 陶瓷薄片研制的陶瓷激光器输出功率最大为 122mW, 斜率效率为 24.5%。日本电气通信大学激光研究所的 LU 等人<sup>[3]</sup>在 2000 年用掺 Nd 原子数分数为 0.01、厚度为 4.8mm 的透明陶瓷薄片获得了功率大于 350mW 的 1064nm 激光, 其斜率效率为 53%, 光光转换效率为 47.6%; 2004 年 LU 等人<sup>[4]</sup>又用掺 Nd 原子数分数为 0.006 的 Nd:YAG 激光透明陶瓷, 采用 LD 抽运, 获得了 110W 的 1064nm 的连续激光输出, 其斜率效率为 41%; 激光器腔体和虚拟点源 (virtual point source, VPS) 抽运系统的简图如图 1 所示。

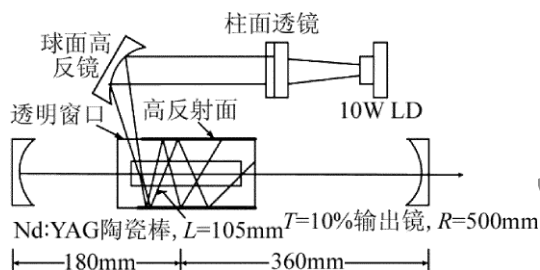


图 1 日本电气通信大学激光研究所的激光器结构图

随后美国、德国、意大利等国家加大了对陶瓷激光器的研究。2005 年, 美国达信公司<sup>[5]</sup>研制出一种 Nd:YAG 陶瓷板条激光器, 其激光输出功率达到 5kW。意大利在 2005 年的陶瓷激光器已达到 350W, 斜率效率达 51%<sup>[6]</sup>。2006 年, 德国的 KRACHT 等人<sup>[7]</sup>报道了他们研制的复合陶瓷 Nd:YAG 激光器, 功率为 144W, 光光转换效率为 64%。同年 3 月, 美国 Lawrence Livermore 国家实验室的研究人员利用日本 Konoshima 化学公司生产的尺寸为 10cm × 10cm × 2cm 的 Nd:YAG 透明激光陶瓷板条研制出高功率全

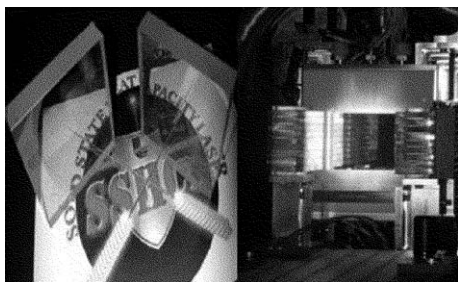


图 2 Lawrence Livermore 国家实验室的高功率全固态热容激光器

固态热容激光器<sup>[8]</sup>, 采用 5 个陶瓷板条产生了 67kW 的平均输出功率。图 2 是其部分实物图。

与此同时, 也有人研究闪光灯抽运的陶瓷激光器。2005 年, Konoshima 化工有限公司的 YAGI 等人用闪光灯抽运 Nd:YAG 多晶陶瓷<sup>[9]</sup>, 获得了 386W 的 1064nm 激光输出, 测得其斜率效率为 2.3%, 与相同尺寸的单晶的输出效果相当。2008 年, 日本大阪激光技术研究所<sup>[10]</sup>用弧形金属灯抽运一种新的陶瓷材料 Nd/Cr:YAG, 得到了连续的 1064nm 的激光输出, 在抽运功率为 9W 的条件下, 获得了 3W 的激光输出, 对应的光光转换效率为 33%。

### 1.2 其它种类 YAG 陶瓷激光器

近几年, 国外许多研究机构对 Yb:YAG 陶瓷激光器进行了大量的研究。日本电气通信大学对 Yb:YAG 陶瓷激光器的研究较早。2003 年, 日本电气通信大学采用纳米技术和真空烧结的方法成功地制造了掺 Yb 的 YAG 陶瓷<sup>[11]</sup>, 并第 1 个用 LD 端面抽运, 激光器的输出功率为 345mW, 斜率效率为 26%。2007 年, 日本的分子科学研究所<sup>[12]</sup>采用复合全陶瓷 Yb:YAG 实现了激光二极管抽运的微片激光器。微片陶瓷晶体的直径为 3.7mm, 厚度为 200 $\mu\text{m}$ 。激光器最高输出 520W 准连续激光和 414W 的连续激光, 对应的斜率效率分别为 56% 和 47%, 具体的输出结果如图 3 所示。

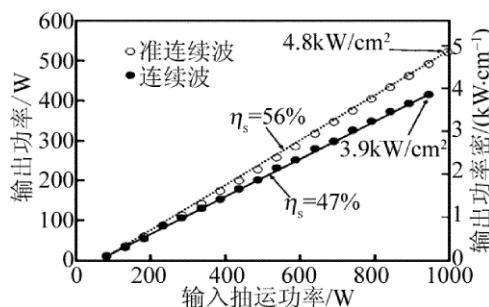


图 3 日本分子科学研究所复合全陶瓷 Yb:YAG 微片激光器的输出结果图

2008 年, 日本的 KAWASHIMA 等人<sup>[13]</sup>在锯型光学谐振腔里用 Yb:YAG 陶瓷板条实现了 302W 的连续激光输出, 对应的光光转换效率为 60.6%。2011 年, 日本激光技术研究所<sup>[14]</sup>报道了他们的复合陶瓷激光器, 输出功率最高可以达到 214W, 斜率效率为 63%。

加利福尼亚的雷神公司<sup>[15]</sup>采用 Yb:YAG 陶瓷激光器研制了微片激光器, 在连续模式, 陶瓷激光器输出 2W ~ 25W 的斜率效率为 66% 的激光; 而在被

动调  $Q$  条件下,用 Cr:YAG 时,产生重频为 11.4kHz,平均功率为 0.72W,斜率效率为 46% 的激光输出。意大利的 PIRRI 等<sup>[16]</sup>于 2009 年搭建出的 Yb:YAG 陶瓷激光器获得功率为 9W 的 1030nm 准连续光输出,斜率效率为 73%,阈值为 1W。2011 年,新加坡南洋理工大学的 LUO 和 ZHANG 等人<sup>[17]</sup>用真空烧结法制备出的激光陶瓷,在 940nm 激光二极管抽运下输出斜率效率为 62.7% 的连续 1030nm 激光。

除了常见的掺 Nd,掺 Yb 以外,YAG 陶瓷激光器还有掺 Tm,掺 Ho 等。2009 年,日本大阪大学 HAZAMA 等人<sup>[18]</sup>研制的 LD 抽运的调  $Q$  Tm, Ho:YAG 陶瓷激光器最大输出能量为 40mJ。

## 2 国内 YAG 陶瓷激光器的研究概况

陶瓷激光器的潜力引起了国内很多研究机构的注意。2006 年,中国科学院上海硅酸盐研究所 PAN 等人<sup>[19]</sup>成功制备出 Nd:YAG 透明陶瓷,利用 LD 端面抽运得到了功率为 1W 的激光输出;2007 年,该所的 WU 等人<sup>[20]</sup>研究 LD 抽运 Yb:YAG 陶瓷激光器获得 1.02W 的 1030nm 激光输出;而该所的 ZHANG 等人<sup>[21]</sup>采用固相法和真空烧结,获得高透明度的 Tm:YAG 陶瓷晶体,并于 2009 年用 LD 端抽运 Tm:YAG 陶瓷板条激光器,获得最大 4.5W 的 2015nm 的激光输出。

中国科学院上海光学精密机械研究所也进行了陶瓷激光器的研究。2004 年,上海光学精密机械研究所的 QI 等人<sup>[22]</sup>用掺钛蓝宝石激光器端面抽运 Nd:YAG 陶瓷激光器获得了 295mW 的 1064nm 的激光输出;第 2 年,他们又用紧密排列的九栈激光二极管阵列侧面抽运 Nd:YAG 陶瓷激光器<sup>[23]</sup>,获得了 236W 的 1064nm 激光输出;2010 年,CHENG 等人<sup>[24]</sup>用波长为 1.91 $\mu$ m 的 Tm:YAG 激光器端面抽运 Ho:YAG 陶瓷激光晶体,当抽运功率为 5W 时,获得了 1.2W 的 2.09 $\mu$ m 激光输出。

2009 年,中国科学院物理研究所的 ZONG 等人<sup>[25]</sup>采用国产陶瓷研制了陶瓷激光器,最大输出功率 76W,光光转换效率与斜率效率分别为 59% 和 63%。2010 年,该所的 ZHOU 等人<sup>[26]</sup>采用 968nm 的光纤耦合 LD 抽运 Yb:YAG 陶瓷激光器,获得 1.9W 锁模激光输出。

2010 年,中国科学院理化研究所 LI 等研制了千瓦级的准连续 1064nm Nd:YAG 陶瓷激光器<sup>[27]</sup>。

该激光器系统采用主振荡功率放大器(master oscillator power-amplifier, MOPA)结构,在抽运功率为 2000W 时,输出功率为 686W;通过陶瓷激光器模块放大后,在总的抽运功率为 3433W 时,输出功率为 1020W。2011 年,复旦大学、南洋理工大学和徐州师范大学<sup>[28-29]</sup>合作研究了 Tm:YAG 陶瓷激光器和 Ho:YAG 陶瓷激光器,输出功率分别为 7.3W 和 21.4W。

## 3 结束语

激光透明陶瓷具有良好的材料和光学特性,并且具有可掺杂浓度高、制备周期短、生产成本低、能够大规模生产等优点,成为继单晶和玻璃之后的又一具有较好前景的激光材料。近年来,国内外对陶瓷激光器的研究比较关注并且取得了较大的进展,随着制备工艺的进一步发展,陶瓷激光器将可能有更好的发展前景。

### 参考文献

- [1] IKESUE A, KINOSHITA T, KAMATA K, *et al.* Fabrication and optical properties of high performance poly crystalline Nd:YAG ceramics for solid state lasers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(4): 1033-1040.
- [2] TAIRA T, KURIMURA S, SAIKAWA J, *et al.* Highly trivalent neodymium ion doped YAG ceramic for microchip lasers [C]// *Advanced Solid-State Lasers*. Boston: Massachusetts, USA: Optics InfoBase, 1999: TUB.
- [3] LU J, PRABHU M, SONG J, *et al.* Optical properties and highly efficient laser oscillation of Nd:YAG ceramics [J]. *Applied Physics* 2000, B71(4): 469-473.
- [4] LU J, TAKAICKI K, UEMATSU T, *et al.* 110W ceramic Nd<sup>3+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser [J]. *Applied Physics* 2004, B79(1): 25-28.
- [5] TRAINOR D W. Ceramic slab Nd:YAG laser emits 5kW [J]. *Laser Focus World*, 2005, 41(10): 16.
- [6] LAPUCCI A, CIOFINI M. Efficiency optimization for a diode-pumped Nd:YAG ceramic slab laser [J]. *Applied Optics* 2005, 44(20): 4388-4393.
- [7] KRACHT D, FREIBRQ D, WILHELM R, *et al.* Core-doped ceramic Nd:YAG laser [J]. *Optical Express*, 2006, 14(7): 2690-2694.
- [8] HELLER A. Transparent ceramics spark laser advances [J]. *Science and Technology Review* 2006(4): 9-16.
- [9] YAGI H, YANAGITANI T, UED K. Nd<sup>3+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser ceramics: Flashlamp pumped laser operation with a UV cut filter [J]. *Journal of Alloys and Compounds* 2006, A21: 195-199.
- [10] SAIKI T, MOTOKOSHI S, IMASAKI K, *et al.* Two-pass amplification of CW laser by Nd/Cr:YAG ceramic Active mirror under lamp light pumping [J]. *Optics Communications* 2009, 282(5): 936-939.
- [11] TAKAICHI K, YAGI H, LU J, *et al.* Yb<sup>3+</sup>-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics—a new solid-state laser material [J]. *Physica Status So-*

- lidi 2003 200(1): R5-R7.
- [12] TSUNEKANE M, TAIRA T. High-power operation of diode edge-pumped, composite all-ceramic Yb:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> microchip laser[J]. Applied Physics Letters 2007 90(12): 121101.
- [13] KAWASHIMA T, IKEGAWA T, MIYAJIMA H, *et al.* 302W diode-pumped cryogenic Yb:YAG ceramics zigzag slab laser with 60% conversion efficiency [C]//Optics InfoBase. Rochester Ny USA: Optical Society of America, 2008: PDP A5.
- [14] FURUSE H, KAWANAKA J, MIYANAGA N, *et al.* Zig-zag active-mirror laser with cryogenic Yb<sup>3+</sup>:YAG/YAG composite ceramics[J]. Optics Express 2011 19(3): 2448-2455.
- [15] OSTBY E P, ACKERMAN R A, HUIE J C, *et al.* Ceramic Yb:YAG microchip laser[J]. Proceedings of SPIE, 2007 6346: 63460V1.
- [16] PIRRI A, ALDERIGHI D, TOCI G, *et al.* High-efficiency, high-power and low threshold Yb<sup>3+</sup>:YAG ceramic laser [J]. Journal of the Optical Society of America 2009 17(25): 23344-23349.
- [17] LUO D W, ZHANG J, XU Ch W, *et al.* Fabrication and laser properties of transparent Yb:YAG ceramics [J]. Optical Materials 2012 34(6): 936-939.
- [18] HAZAMA H, YUMOTOB M, OGAWA T, *et al.* Mid-infrared tunable optical parametric oscillator pumped by a Q-switched Tm, Ho:YAG ceramic laser [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7197: 71970J1.
- [19] PAN Y B, XU J, WU Y S, *et al.* Fabrication and laser output of Nd:YAG transparent ceramic [J]. Journal of Inorganic Materials, 2006 21(5): 1278-1280 (in Chinese).
- [20] WU Y S, LI J, PAN Y B, *et al.* Diode-pumped Yb:YAG ceramic laser [J]. Journal of the American Ceramic Society 2007 90(10): 3334-3337.
- [21] ZHANG W X, PAN Y B, ZHOU J, *et al.* Diode-pumped Tm:YAG ceramic laser [J]. Journal of the American Ceramic Society 2009 92(10): 2434-2437.
- [22] QI Y F, LOU Q H, MA H X, *et al.* Highly efficient Nd:YAG ceramic CW laser with 59.8% slope-efficiency [J]. Chinese Optics Letters 2005 3(2): 89-91.
- [23] 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]. Journal of the Optical Society of America 2005, 13(22): 8725-8729.
- [24] CHENG X J, XU J Q, WANG M J, *et al.* Ho:YAG ceramic laser pumped by Tm:YLF lasers at room temperature [J]. Laser Physics Letters 2010 7(5): 351-354.
- [25] ZONG N, ZHANG X F, LI F Q, *et al.* 76W continuous wave 1064nm domestic Nd:YAG transparent ceramic laser [J]. Chinese Journal of Lasers 2009, 36(7): 1899-1899 (in Chinese).
- [26] 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(30): 288-290.
- [27] LI C Y, BO Y, WANG B S, *et al.* A kilowatt level diode-side-pumped QCW Nd:YAG ceramic laser [J]. Optics Communications 2010 283(24): 5145-5148.
- [28] WANG Y, SHEN D Y, CHEN H, *et al.* Highly efficient Tm:YAG ceramic laser resonantly pumped at 1617nm [J]. Optics Letters 2011 36(23): 4485-4487.
- [29] CHEN H, SHEN D Y, ZHANG J, *et al.* In-band pumped highly efficient Ho:YAG ceramic laser with 21W output power at 2097nm [J]. Optics Letters 2011 36(9): 1575-1577.