

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0290-04

激光晶体的研究现状和进展

徐军, 苏良碧, 姜本学, 徐晓东, 赵志伟, 赵广军, 李红军, 张连瀚, 严成锋, 梁晓燕

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 分析了面向先进制造技术、“新概念”激光武器等应用的(1 μm 波段)高平均功率、大能量激光晶体的国内外研究现状, 并指出了其未来主要发展趋势。

关键词 材料; 激光晶体; 板条激光器; 盘片激光器; 固体热容激光器

中图分类号 TN248.1; O78 **文献标识码** A

Recent Developments of Laser Crystals

XU Jun, SU Liang-bi, JIANG Ben-xue, XU Xiao-dong, ZHAO Zhi-wei, ZHAO Guang-jun,

LI Hong-jun, ZHANG Lian-han, YAN Cheng-feng, LIANG Xiao-yan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Recent developments and research status of laser crystals for high-power and large-energy lasers at around 1 μm for advanced fabricating techniques and novel laser weapons were reviewed.

Key words materials, laser crystal, slab laser, disk laser, solid state heat capacity laser

1 引言

激光材料是激光技术发展的核心和基础, 具有里程碑的意义和作用: 20 世纪 60 年代第一台红宝石晶体激光器问世, 激光诞生^[1]; 70 年代研制成了掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)^[2], 固体激光开始大力发展; 80 年代钛宝石晶体(Ti:Al₂O₃)的发展^[3], 使超短、超快和超强激光成为可能, 飞秒激光科学技术蓬勃发展, 并渗透到各基础和应用学科领域; 90 年代钕酸钇晶体(Nd:YVO₄)的出现^[4], 使固体激光的发展进入新时期——全固态激光科学技术(SSDPL); 进入 21 世纪, 20 世纪 60 年代初出现的激光和激光科学技术, 正以其强大的生命力推动着光电子技术和产业的发展, 激光材料也在单晶、玻璃、光纤、陶瓷等四方面全方位迅猛展开, 如微一纳米级晶界、完整性好、制作工艺简单的微晶激光陶瓷和结构紧凑、散热好、成本低的激光光纤, 正在向占据激光晶体首席达 40 年之久的 Nd:YAG 发出强有力的挑战, 激光材料也已从最初的几种基质材料发展到数十种^[5], 是受到各国政府、科学界乃至企业界高度重视的领域。

纵观固体激光器的应用现状和发展前景, 现阶段激光晶体的主要发展趋势有如下 4 个方面, 并将取得突破和实际应用: 1) 高功率、大能量激光晶体(1 μm 波段), 如 Yb:YAG, Nd:GGG 等; 2) 面向人眼安全、遥感、光通信、医疗等应用的红外激光晶体; 3) 面向全色显示、光刻等应用的蓝绿紫和可见光激光晶体; 4) 激光二极管抽运超快激光增益和放大介质材料。其中高平均功率、大能量激光晶体主要有 Nd:YAG, Nd:GGG 和 Yb:YAG, 它们的发展对未来高技术产业及国防建设有重大的战略意义和现实意义, 对其他几个方面的发展也有带动意义。

2 Nd:YAG 激光晶体

Nd:YAG 晶体的出现使固体激光器真正开始大力发展, 并实现商业化, 因其增益高、热性能和机械性能良好而成为当前科研、工业、医学和军事应用中最重要的激光晶体。特别是在高功率连续和高平均功率固态激光器方面, 20 世纪 90 年代前, 闪光灯抽运的 Nd:YAG 激光晶体独占鳌头, 单根棒的输出功率可达 kW 量级。

基金项目: 国家高技术 863 计划新材料领域项目(2002AA311030)和国家杰出青年基金(60425516)资助课题。

作者简介: 徐军(1965—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士生导师, 主要从事激光和光功能材料的制备、结构、缺陷、光谱和激光性能以及宽禁带半导体氮化物和 ZnO 衬底材料的研究。E-mail: xujun@mail.shcnc.ac.cn

多棒串接结构激光器:20世纪90年代以来,随着激光二极管的迅速发展,大功率激光器的抽运方式也有重大发展^[6,7]。LD抽运激光器的高效率、高质量、长寿命、高可靠性、小型化以及全固化等优越性是闪光灯抽运无法相比的。高功率输出一般采用多棒Nd:YAG系统,柏林激光医疗技术公司(LMTB)和亚琛Fraunhoferstr激光技术研究所(ILT),采用腔内二棒串接,每棒用12个激光二极管阵列(总功率3600W)单侧抽运技术,输出功率已接近2kW,并完成了中试研究工作。日本Takose等人实现的最大输出功率为5kW。德国Rofin-Sinar公司主要研究开发用于材料加工的高功率DPSSL系列产品,用8根棒串接已获得6kW的输出功率,并有可能实现万瓦输出。我国中国科学院物理研究所和中国科学院上海光学精密机械研究所等合作,也于2004年采用多棒Nd:YAG串接获得大于1kW的输出。多棒Nd:YAG系统的优点是结构简单,工作稳定可靠,适宜于工业应用,但光束质量较差。

板条(Slab)结构激光器:板条概念是20世纪70年代提出来的,其特点是它的温度梯度主要平行于激光束,而不是象棒状激光器那样垂直于激光束,因此在理想状态下不会导致激光材料的热透镜效应和应力双折射,适宜于大功率运转。1993年,激光二极管抽运的Nd:YAG板条就已获得2.3kW的平均输出功率激光。日本Fanuc公司(日本MITI计划)采用两面抽运结构^[8],两面的抽运模块分别抽运晶体的上下两部分,抽运光经过晶体后,被晶体后面的全反射面再次反射回晶体,充分吸收,单块尺寸6mm×2.5mm×206mm板条,当输入功率为9.5kW时,已实现3.3kW的功率输出,光效率35%。最近美国Northrop Grumman正在发展25kW的Nd:YAG板条器件。国内,中国科学院上海光学精密机械研究所利用温梯法生长的Nd:YAG晶体切割成的片子59mm×40mm×4mm,用一组激光二极管抽运,已经获得700mJ的单脉冲能量,频率可达到1000Hz,平均功率约为700W,若用两组激光二极管抽运估计可以获得1200~1400W能量的激光输出。2004年^[9],中国工程物理研究院的姚振宇实验组用两块φ13mm×1mm的Nd(原子数分数为1.4%):YAG薄片,采用之字形,平凹腔稳态结构,获得了峰值功率为1440W,平均为216W的准连续激光输出。板条激光器输出功率高、光束质量好,很有前途,但其调整较困难,目

前为止,工业应用还较少。

盘片(Disk)结构激光器:传统的固体激光器冷却是沿着垂直光轴的横向进行热传递的,因而由于温度的升高而引发激光材料的热透镜效应和应力双折射等,导致光束质量变差,能量损失也大。为此,1992年德国斯图加特大学和宇航公司发明了盘状激光器^[6,7]。利用很薄的盘片晶体来作激光器的增益介质,冷却沿着与光轴平行的方向,由于热源与热沉之间的距离很小,因此即使在抽运功率很高的情况下,晶体内部的升温也不会很大,当抽运光以近平面波入射,且晶体的直径比厚度大很多的情况下,其热能量可被看成是一维情形,这样晶体内部温度的均匀分布大大消除了晶体的热形变。这一远远优于传统冷却的方案,使得在抽运功率密度不变的情况下,只需增大抽运直径,就可简单提升输出功率。根据盘片的热应力极限,可以计算出当激光输出为连续或者准连续时,四能级的粒子的可提取能量为^[10,11]:

$$P_{\text{avail,avg,max}} = (\pi/4)(3Rb\eta_u I_{\text{sat}} \phi_d \phi d^3 f_h^{-1} B^{-1})^{1/2}.$$

最大可提取能量为与盘片直径的1.5次方成正比。用 $N=4$, $d=5\text{cm}$, $L=0.25\text{cm}$,计算出的 $P_{\text{avail,avg,max}}$ 列入表1中。热应力极限下,Nd:YAG的理论值比Nd:GGG高出近1/3。

表1 热应力极限下Nd:YAG和Nd:GGG理论能量输出比较

Table 1 $P_{\text{avail,avg,max}}$ for Nd doped YAG and GGG crystals with two different pump conditions

Crystal	$P_{\text{avail,avg,max}}$ pumped by 808 nm /kW	$P_{\text{avail,avg,max}}$ pumped by 885 nm /kW
Nd:YAG	32	62
Nd:GGG	26	48

由于国际晶体生长界难以获得较大面积的Nd:YAG盘片晶体,盘片结构激光器应用最为成功的主要是Yb:YAG和Nd:GGG两种激光晶体。盘片激光根据热管理方式的不同,分为连续散热冷却的薄片激光(如Yb:YAG)和间歇冷却的固体热容激光器。

但是,Yb:YAG晶体是一种准三能级激光系统,室温下激光下能级(约 612cm^{-1})的热布居比例为4.2%^[12]。因此,Yb:YAG具有较高的抽运阈值功率,且激光性能受温度的影响很大,必须通过冷却晶体获得高效率的激光运转。为此,寻找新的基质晶体或通过结构、组成设计获得低阈值、高效率的掺Yb激光介质是一个主要的研究方向。

3 Nd:GGG 激光晶体

固体热容激光(SSHCL)是一种介于单次和稳态激光器之间的一种新型激光器,它工作于激光材料的热容限内,以独特的间歇猝发脉冲串的工作方式(激光发射与晶体冷却交替进行)有效克服了固体激光器工作时的热效应瓶颈,在脉冲发射期间内获得高平均功率激光输出。固体热容激光器的概念20世纪70年代就有人提及,1991年美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)开始讨论,1995年Walters等发表了相关研究文章,1996年Albercht等申请了“高能量猝发固体热容激光器”的专利^[13,14]。

通过基质晶体中阳离子置换形成的Nd:GGG激光晶体,与Nd:YAG比较具有如下优点:1)Nd³⁺在GGG中的分凝系数等于0.5,是YAG(0.18)的近3倍;2)Nd:GGG的平界面生长较Nd:YAG的凸界面更容易获得大尺寸、高质量的单晶体。而且,Nd:GGG具有好的热机械性能、化学稳定性和高的热导率,是新一代高功率固体热容激光器的优选工作物质。

2002年12月,LLNL用激光二极管抽运Nd:GGG首次出光,一块50 mm×100 mm×5 mm板条,重复频率200 Hz时的平均输出功率达到3 kW。

2003年3月,LLNL用激光二极管抽运Nd:GGG,3块80 mm×80 mm×x mm板条,重复频率200 Hz时的平均输出功率达到10 kW。

2004年,LLNL用激光二极管抽运Nd:GGG,4块100 mm×100 mm×20 mm板条串接起来,输出功率又突破30 kW,工作时间1 s。预期到2007年达到一个脉冲100 kW,每秒200个脉冲。作为武器级的Nd:GGG热容激光器,其功率必须达到100 kW以上。目前所生长的晶体尺寸还没有达到武器级的需要。按照美国利弗莫尔国家实验室Nd:GGG热容激光武器方案,晶体的直径至少必须达到 $\phi 160$ mm以上。为了实现100 kW里程碑式的目标,Armstrong公司将要采用9个Nd:GGG方形板条,每一块大约12 cm长。这种情况下,为了得到33%的光-光转换效率和大约10%的最终“墙插座”初级电源转换效率,将需要生成大约35 kW的光学抽运峰值功率^[14]。

2005年2月中国工程物理研究院也已报道激光二极管抽运Nd:GGG固体热容激光输出大于1.4 kW,连续出光时间2 s。近期有望突破3 kW。

与Nd:GGG相比,1)Nd:YAG有良好的热性能和物化性能,如其热透镜效应仅是Nd:GGG的1/2(见表2);2)热应力极限下,Nd:YAG的激光输

出理论值比Nd:GGG高出1/3(见表1)。如能突破Nd:YAG的生长技术(晶体中心无应力集中区——即“核心”区),意义将十分重大。中国科学院上海光学精密机械研究所此研究基础,早在上世纪80年代,邓佩珍教授等就已初步研制出 $\phi 80$ mm×120 mm的无“核心”的Nd:YAG晶体^[15]。

表2 Nd:YAG和Nd:GGG晶体热效应性能比较
Table 2 Comparison of thermal effect between Nd:GGG and Nd:YAG

	Nd:GGG	Nd:YAG
dN/dT	1.75×10^{-5}	0.9×10^{-5}

当然,在轻便型的激光器方面,由于Nd:YAG和Nd:GGG在808 nm的吸收峰线宽仅1 nm,而典型激光二极管输出线宽达3 nm,且发射波长存在0.2~0.3 nm/°C的温度系数。因此,采用激光二极管抽运Nd:YAG时,为了提高抽运效率,使激光二极管的输出波长正好对准Nd:YAG的吸收峰,需要使用额外的制冷装置控制激光二极管的工作温度。为此,国际上掀起了探索适于激光二极管抽运的高效率、宽吸收带激光晶体的研究热潮。

4 Yb:YAG 激光晶体

Yb³⁺与Nd³⁺相比具有如下优点:1)能级结构简单,高浓度掺杂不产生荧光猝灭;2)与晶场耦合作用强,具有宽得多的吸收峰线宽,激光二极管抽运下无需要温度控制系统;3)前者的荧光寿命一般为后者的4倍,更有利于储能;4)量子缺陷较低,无辐射弛豫引起的材料中的热负荷低,仅为掺Nd³⁺同种激光材料的三分之一。因此,激光二极管抽运的Yb:YAG固体激光器的输出功率很快就赶上了在固体激光器领域一直占垄断地位的Nd:YAG,从最初的23 mW增加到kW级^[16]。从上世纪90年代初,许多国际著名研究机构如美国的LLNL,林肯实验室(MIT),德国斯图加特大学和JENA大学,瑞士联邦工学院,英国南安普敦大学,法国LULI实验室,日本大阪大学和HOYA公司等纷纷开展了Yb:YAG激光器件的研究,将其视为发展高功率激光的一个主要途径^[17~21]。

1991年,美国林肯实验室(MIT)首次在室温下采用InGaAs激光二极管抽运Yb:YAG晶体获得23 mW连续激光输出。1992年德国Stuttgart大学和宇航公司发明的盘状激光器,利用Yb:YAG这样优秀的激光介质,首次即获得很大的成功,其应用前景

十分看好。2001年美国休斯实验室获得了2.65 kW激光输出,光-光转换效率为28%。2004年,Yb:YAG盘片激光器的输出功率已经达到4.4 kW。

德国ELS公司已开发出5 W,20 W,30 W,50 W,100 W薄片单频连续固体激光器。

2002年,德国Trump公司已成功推出1.5 kW的工业用Yb:YAG盘片激光器,光束质量为6 mm/mrad,通过150 μ m的光纤传输。2004年又开始推出4 kW的工业用Yb:YAG盘片激光器。并推测可从单个盘片中实现10 kW输出。

在国内,中国科学院上海光学精密机械研究所于1997年在国内首次获得了400 mW的连续激光输出^[22],并与法国LULI国家实验室联合正在发展激光二极管抽运Yb:YAG平均输出kW级,100 J(ns)的LUCIA激光系统。2005年,清华大学采用2 kW的激光二极管抽运Yb:YAG晶体获得了520 W的连续激光输出^[23]。最近,又首次在国内获得了1 kW的激光输出。

今后无论是Yb:YAG增益盘片,还是用作放大介质(如LUCIA激光系统需要大于45 mm口径的晶体盘片),均需要发展大尺寸、无“核心”的Yb:YAG晶体生长技术。2003年中国科学院上海光学精密机械研究所成功生长出75 mm无“核心”区的Yb:YAG晶体,为此发展打下了基础。

5 结 论

为了能满足激光加工制造业不同应用的需求、带动我国相关LD抽运源、激光晶体、耦合、传输等技术,并实现跨越式发展,建议采用较为先进的盘片晶体(Disk)结构激光和板条晶体(Slab)结构激光。并同时考虑部署部分光纤和陶瓷激光技术的研发。

参 考 文 献

- 1 T. H. Maiman. Stimulated optical radiation in ruby [J]. *Nature*, 1960, **187**(4736): 493~494
- 2 H. G. Danielmeyer, F. W. Ostermayer, Jr.. Diode-pump-modulated Nd:YAG laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(6): 2911~2913
- 3 D. A. Gilmore, P. Vujkovic, G. H. Atkinson. Interactivity absorption spectroscopy with a titanium sapphire laser [J]. *Opt. Commun.*, 1990, **77**: 385~389
- 4 L. de Shazer. Vanadate crystals exploit diode-pump technology [J]. *Laser Focus World*, 1994, **30**(2): 88
- 5 Gan Fuxi, Deng Peizhen. Laser Materials [M]. Shanghai, Shanghai Science and Technology Press, 1995
- 干福熹,邓佩珍. 激光材料 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1995
- 6 A. Giesen, H. Hugel, A. Voss *et al.*. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**(5): 365~372
- 7 C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disk laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, 2002, **6**: 650~657
- 8 K. I. Matsuno, T. Sato. Development of high-power all-solid-state lasers in Japanese MITI Project [C]. *SPIE*, 2000, **3889**: 172~181
- 9 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. High-power diode-pumped Nd:YAG disk laser [C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 112~120
- 10 John Vetovec. Compact active laser [C]. *SPIE*, 2002, **4623**: 104~114
- 11 J. Vetovec. Materials for high-average power solid-state laser [C]. *SPIE*, 2003, **4968**: 87~96
- 12 Jin Feng, Zhou Dingfu. High power solid-state heat capacity laser development [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(5): 534~538
- 金 锋,周鼎富. 高功率固体热容激光器 [J]. *激光技术*, 2004, **28**(5): 534~538
- 13 G. Albrecht, E. V. George, F. K. William *et al.*. High energy bursts from solid state laser operated in the heat capacity limited regime [P]. United States Patent; 5526372, 1996206211
- 14 H. J. Hoffmann, S. Glaswerke. Solid state laser rods for high power conditions [P]. United States Patent; 4845721, 1989207204
- 15 Deng Peizhen, Qiao Jingwen, Hu Bing *et al.*. Perfection and laser performances of Nd:YAG crystals grown by temperature gradient technique (TGT) [J]. *J. Crystal Growth*, 1988, **92**: 276~286
- 16 P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang *et al.*. Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14): 1089~1091
- 17 C. Bibeau, R. J. Beach, S. C. Mitchell *et al.*. High-average-power 1- μ m performance and frequency conversion of a diode-end-pumped Yb:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(10): 2010~2019
- 18 E. C. Honea, R. J. Beach, S. C. Mitchell *et al.*. High-power dual-rod Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11): 805~807
- 19 D. S. Sumida, H. Bruesselbach, R. W. Byren *et al.*. High-power Yb:YAG rod oscillators and amplifiers [C]. *SPIE*, 1998, **3265**: 100~105
- 20 H. Bruesselbach. Power sealing issues for Yb:YAG lasers [R]. Presented at the Optical Society of America 2001 Annual Meeting, Long Beach, CA, 2001. 14~18
- 21 T. S. Rutherford, W. M. Tulloch, E. K. Gustafson *et al.*. Edge-pumped quasi-three-level slab lasers; design and power scaling [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2): 205~219
- 22 Hongbin Yin, Peizhen Deng, Fuxi Gan. Defects in YAG:Yb crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**: 3825~3828
- 23 Q. Liu, M. Gong, F. Lu *et al.*. 520 W continuous-wave diode corner-pumped composite Yb:YAG slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 726~728