

下一代固体激光器:陶瓷激光器

任国光¹, 刘淑英²

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 2. 国家重点实验室, 北京仿真中心, 北京 100854)

摘要:在未来的许多应用中, 陶瓷激光增益介质将代替单晶介质, 这被认为是固体激光器的一次真正的革命。文中评述了陶瓷增益介质的发展及其优点, 介绍了美国空军和陆军研究实验室对陶瓷介质特性进行的较为系统的研究。最后评论和分析了目前美国正在研制的两种具有高束质的大功率陶瓷激光器及其关键技术。

关键词:二极管抽运固体激光器; 高功率陶瓷激光器; 固体热容激光器; 薄锯齿形激光器技术

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

The Next Generation of Solid-state Lasers: Ceramic Lasers

REN Guo-guang¹, LIU Shu-ying²

(1. Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;

2. State Key Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: Ceramic laser gain media not only has excellent physical and optical properties but also has high resistance to fracture, potential damage resistance and machinability over single crystals. It is certain that ceramic gain media will replace single crystals in the future many applications. A ceramic laser is a real revolution in solid state lasers. Developments and advantages of ceramic gain media are reviewed. The systematic study of ceramic gain media properties which has been conducted by U. S. AFRL and ARL is introduced. Finally, two high-power ceramic lasers with excellent beam quality and the key technologies which are being developed by America are reviewed and analyzed.

Key words: DPSSL; high-power ceramic laser, SSHCL; thinzag laser technology

1 引言

美国的“联合高功率固体激光器”(JHPSSL)计划的目的是要开发一种高束质的小型、轻量、高平均功率、高脉冲能量的军用固体激光器, 用于执行地面短程防空和反导任务, 军舰自卫和机载平台的精确打击任务。文献[1]评述和分析了该计划的主要技术指标和正在研制的采用单晶激光增益介质的三种固体激光器^[1], 最后决定由诺·格公司和达信公司在2009年分别研制出100kW的单晶Nd:YAG激光器和陶瓷Nd:YAG激光器。最近, 诺·格公司已研制出100kW固体激光器的增益模块, 输出功率超过

3.9kW, 效率20.6%, 持续工作时间500s^[2], 这些指标都超过了JHPSSL计划第三阶段的演示要求。而且与上一发展阶段的系统相比, 第3阶段的激光器在大小、质量和功率方面都取得了明显的改善。

本文将评述JHPSSL计划发展的另一种固体激光器——高功率陶瓷激光器。从热管理和制造的角度来看, 单晶材料并不是一种理想的激光增益介质。采用多晶陶瓷增益介质被认为是固体激光器的一次

作者简介: 任国光(1938-), 男, 研究员, 主要从事激光技术发展战略研究工作。E-mail: ren_huang@sina.com

收稿日期: 2008-03-23

真正的革命,它具有甚至超过单晶固体激光器的性能,但却像制造玻璃那样容易,而与玻璃相比它又具有更高的热导率和更抗热损伤。陶瓷技术远优于目前的晶体生长技术,因为它是一种将复合器件结构、新材料、尺寸定标和高制造效费比结合在一起的唯一制造技术。另外,由于能够改变陶瓷介质的物理和光学特性,它所提供的激光器设计灵活性,可使其具有常规固体激光器达不到的性能。未来还有可能制造出量子数亏损非常低的($<5\%$)的陶瓷增益介质,这对激光器的功率定标意义重大。由于这些原因,可以肯定在未来的许多应用中陶瓷增益介质将代替单晶介质。为了扩展激光科学,科学家们正在设计采用陶瓷增益介质的下一代固体激光器。对防御应用来说需要平均功率非常高的激光器,而陶瓷这种具有高热导率和高光学品质的大尺寸激光增益介质是非常重要的。

2 陶瓷激光增益介质的发展及其鲜明的优点

2.1 发展概况

透明陶瓷早在20世纪50年代就有了,但是损耗严重,这是因为多晶陶瓷在磁畴界壁有很强的散射,造成大的损失。只是从90年代开始,由于对高功率固体激光器的需求,才促使材料科学家去研究YAG陶瓷的可能性。开发激光器级透明陶瓷面临的主要挑战是大大降低散射损失,科学家们通过采用粉末这种比较小的粒子和改进产生微米粒子的制造技术(特别是真空烧结),获得了非常小的微晶粒(几微米)和非常低的孔隙率。在激光路径中,陶瓷板条的微晶粒之间包含有几万个边界,即细粒边界,然而激光通过时却“看不见”这些宽度小于 $1\mu\text{m}$ 的细粒界面,这就大大降低了散射损失,达到了激光器要求的性能。

日本的研究人员在开发陶瓷增益介质和陶瓷激光器方面作出了杰出的贡献,特别是在降低陶瓷介质的散射损失方面。1995年,Akio Ikesue 报告获得了衰减系数达 0.009cm^{-1} 的透明陶瓷,并演示了第一个氧化物陶瓷激光器。这一成果归因于几项改进,特别是采用了基于硅石的烧结,大大降低了材料的孔隙率。5年后,由Ken-ichi Veda 领导的另一日本研究小组通过改进陶瓷制造技术,导致损耗进一步降低,将光-光效率提高到了53%。

另外,美国斯坦福大学也正在通过降低激光吸

收损失和寻找具有高热导率和高效小量子数亏损抽运频带的激光增益介质,开发可定标的高功率陶瓷固体激光器^[3]。图1给出了降低陶瓷Nd:YAG激光增益介质的散射损失和提高激光器平均功率所取得的进展。

迄今陶瓷Nd:YAG已达到了99.9999%的理论密度;显微硬度和断裂韧度比单晶YAG分别高10%和5倍,激光器的斜率效率达到82%^[4],平均输出功率达到15kW^[5]。

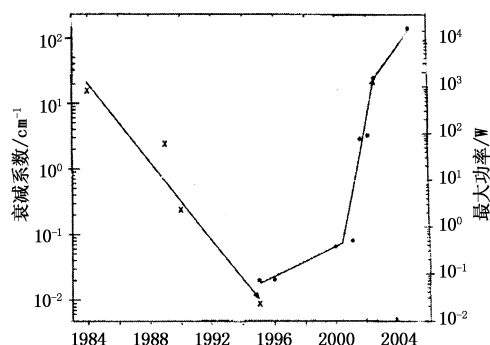


图1 陶瓷Nd:YAG降低散射损失和提高平均功率所取得的进展

目前有多种陶瓷材料可用作激光增益介质,但最重要的是Nd:YAG,它具有高的热导率($10.7\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$)和优良的光学品质,这对高平均功率激光器来说至关重要。Yb:YAG是另一种有吸引力的高平均功率激光器的增益介质材料,而且它有大的增益带宽,也适用于产生短锁模脉冲的激光器。

除此以外,可作激光增益介质的陶瓷材料还有Nd:YSAG, Nd:Y₂O₃和Yb:Sc₂O₃等。

2.2 陶瓷激光增益介质的鲜明优点

陶瓷激光增益介质的物理和光学特性在许多方面与单晶增益介质基本相同,但它还具有下列的鲜明优点:

(1)陶瓷增益介质的大小和形状仅受限于加工设备。陶瓷增益介质基本上能制造成任意的形状和尺寸,而单晶生长技术对尺寸受到严格的限制。就高功率固体激光器而言,可能最大的优点是可以制造大口径的增益介质。目前已能制造米级的陶瓷增益介质^[6],这对激光武器和激光聚变驱动器是很有吸引力的。

(2)陶瓷的制造周期短、成本低。陶瓷是由高纯度的YAG纳米粉成形为所需的形状,然后在真空中焙烧而成,一般仅需24h。而目前普遍采用的Czochralski单晶生长法需要两周或更长时间。

(3) 陶瓷增益介质提供了激光器设计的灵活性。至少对 Nd:YAG 陶瓷来说,能获得高的掺杂浓度,而不会因猝灭效应而降低激光效率。Konoshima 化学有限公司已经演示了均匀掺杂浓度达 9% 的 Nd:YAG 陶瓷。同时,可以比较容易制造出各种掺杂分布的陶瓷。这些都能改变陶瓷的物理与光学特性,有可能获得其他常规激光器不具备的特性,这就增加了激光器设计的灵活性。

(4) 有可能获得量子数亏损非常低的增益介质。通过提高 Nd:YAG 的掺杂浓度,有可能抽运平常没有足够高吸收系数的钕频带。最近演示了 Nd:YAG 在 885nm 频带的跃迁,在此频带的抽运大有好处,因为与通常在 808nm 的抽运相比,它把量子数亏损降低了 30%,因此提高了总效率和减小了热负载,有助于将固体激光器定标到更高的功率。预测未来有可能获得量子数亏损小于 5% 的陶瓷增益介质。

(5) 能制成单晶很难生长的某些增益介质材料。某些材料,例如氧化钇 (Y_2O_3) 和其他具有高熔化温度的倍半氧化物很难生长成单晶(例如 Y_2O_3 的熔点就高达 2430℃),但却能容易地制成陶瓷增益介质,因为陶瓷的烧结温度远低于熔化温度。 Y_2O_3 的热导率很高是 YAG 的两倍,使它更适合用于大功率固体激光器。在 2003 年 4 月演示了第一台 Yb:Y₂O₃ 陶瓷激光器。

(6) 容易制成复合增益介质。陶瓷非常适合产生复合增益介质,包括具有不同掺杂浓度的介质,甚至是不同掺杂物的介质。

3 陶瓷激光介质的物理与光学特性

对陶瓷激光增益介质的研究主要集中在 Nd:YAG,近年来研究工作取得了长足的进展。特别是美空军研究实验室和陆军研究实验室的科学家,为了确定陶瓷 YAG 适合用于高功率激光器,分别对陶瓷 YAG 介质的性能作了较广泛的研究^[7-8],他们的研究结果具有类似性,在相同的 Nd³⁺ 浓度时陶瓷 YAG 和单晶 YAG 的性能在许多方面基本相同,有某些特性则优于单晶材料。只有当掺杂浓度比单晶的掺杂浓度高 4 倍以上,陶瓷介质的性能才明显不同于单晶材料。

3.1 陶瓷与单晶激光介质的物理特性

表 1 给出了掺杂 1% Nd³⁺ 的陶瓷激光介质的物理特性并与同样掺杂浓度的单晶材料作了比

较。两者的大部分物理特性都相同,它们包括折射率 1.8169,热导率 10.7W/(m·℃),弹性模量 2.82×10^{11} N/m²,泊松系数 0.28,热胀系数 8.0×10^{-6} /℃,质量密度 4.55×10^3 kg/m³ 和比热 5.9×10^2 J/(kg·℃)。

表 1 陶瓷与单晶 YAG 激光增益介质的不同物理特性

参量	单晶 YAG	陶瓷 YAG
最大掺杂浓度(均匀)/%	~1.2	>4
破裂极限应力/(N·m ⁻²)	$2 \sim 2.5 \times 10^8$	1×10^9

从表 1 也可看出 Nd:YAG 的可掺杂浓度和破裂极限应力明显高于单晶材料,这是陶瓷 Nd:YAG 优于单晶材料之处。因为单晶 YAG 的掺杂浓度若超过 1.4% 就无法获得 YAG 的坚硬晶体结构。而陶瓷 YAG 能有高的掺杂浓度,随 Nd³⁺ 浓度的增加,吸收和发射特性呈小的线性增长,并可在提高吸收系数和降低上激光能级衰减时间之间作出最佳的折中选择。此外,陶瓷 YAG 具有较高的破裂极限应力,从而能承受更高的抽运功率。

3.2 陶瓷与单晶增益介质的光学特性

为了确定激光陶瓷是否适用于高功率激光器,美空军研究实验室的科学家对陶瓷 YAG 增益介质的光学性能作了系统的研究。他们比较了掺杂 0~9% Nd³⁺ 的陶瓷 YAG 和掺杂 1% Nd³⁺ 的单晶 YAG 材料的光学特性,测量了包括散射、吸收、热-光特性、荧光和激光损伤等参量。

在室温下的测量表明陶瓷和单晶样品在 808.8nm 和 798.8nm 处有强的吸收峰,在同样是 1% 掺杂情况下,两者几乎有相同的线宽。只是在 4% 和 9% 的掺杂情况下,陶瓷介质的吸收峰稍有增宽,即使是最重掺杂的样品(9%),吸收峰增宽也只有 10%。发射测量表明同是 1% 掺杂的陶瓷和单晶材料,它们的信号发射强度与线宽没有明显的差别,然而随着掺杂 Nd³⁺ 浓度增加,发射信号强度明显下降和发射线增宽。

荧光寿命时间的测量表明在同是 1% 掺杂下,两者的荧光寿命时间几乎都是 230ms,随着掺杂 Nd³⁺ 浓度的增加,陶瓷材料的荧光寿命时间迅速下降,在掺杂 9% Nd³⁺ 时已低至 30ms。

测量表明同是 1% Nd³⁺ 浓度掺杂时,两者的折射率相同,在 2% Nd³⁺ 浓度时陶瓷材料的折射率有些升高,而在 8% Nd³⁺ 浓度时折射率则明显升高。

在掺杂 1% ~ 2% Nd^{3+} 浓度下的测量表明,在陶瓷与单晶样品之间的热-光系数没有明显的差别。

材料的散射表征了它用于激光器的品质,为了全面地评估材料的光学质量,在 0.458 μm 与 1.06 μm 之间测量了光散射。测量表明在上述波长范围内,掺杂 1% Nd^{3+} 的陶瓷材料的散射明显低于相同掺杂浓度的单晶材料,如图 2 所示。在 1.064 μm 波长下进行的广泛测量并未发现散射强度随掺杂的 Nd^{3+} 浓度增加有任何明显变化的趋势。现在正对可见光进行更多的散射试验,进一步了解陶瓷材料的散射。

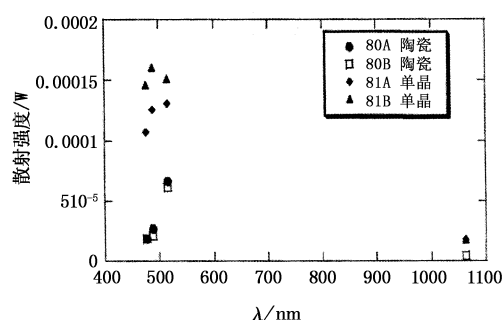


图2 陶瓷和单晶材料的散射强度与波长的关系

研究人员测量了表面有镀膜和无镀膜样品的体积破坏和表面破坏阈值,激光破坏测量是对掺杂 Nd^{3+} 浓度从 0.1% ~ 8% 的样品进行的。对于掺杂 Nd^{3+} 浓度高达 4% 的表面破坏阈值基本上与掺杂浓度和表面是否有镀膜无关。体积破坏阈值的测量表明,只是在掺杂 8% Nd^{3+} 浓度的情况下,体积破坏阈值才有明显的下降。

总体来讲,在相同的掺杂 Nd^{3+} 浓度情况下,陶瓷 YAG 与单晶 YAG 的光学特性在许多方面基本相同,某些特性则优于单晶材料,特别是陶瓷材料的低散射和低吸收损失。只有当掺杂浓度比一般晶体的掺杂浓度高 4 倍以上,陶瓷的性能才明显不同于单晶材料。

4 达信系统公司的高功率陶瓷激光器及其关键技术

4.1 达信系统公司开发 100kW 陶瓷固体激光器

2006 年 1 月,高能激光器联合技术办公室宣布诺·格公司和达信系统公司将进入 JHPSSL 计划的第三发展阶段,用 3 年时间研制出 100kW 的固体激光器^[9]。诺·格公司研制的是单晶 Nd:YAG 激光器,而达信系统公司开发的是陶瓷 Nd:YAG 激光器,表 2 给出了该计划 100kW 固体激光器的主要技术指标。

表2 JHPSSL 计划 100kW 固体激光器的主要技术指标

平均输出功率 > 100kW	光束质量 $\beta = 2 \times \text{DL}$
总效率 > 20%	运行时间: 300s
启动时间: 1s	比质量: 50W/kg
光束抖动 < 5% 远场瞬时束直径	环境温度 5 ~ 35℃ (工作) - 20 ~ 40℃ (储存)

过去半个世纪以来,达信系统公司一直是研发高功率激光器的开拓者和技术领先者,从 20 世纪 60 年代到 80 年代研发气体激光器,从 90 年代至今主要发展具有突破性的固体激光器概念。

目前,达信系统公司的激光器设计已从晶体转向了陶瓷,公司的科学家和工程师正在将他们的薄锯齿形激光器光学体系结构与最新开发的陶瓷 Nd:YAG 激光材料相结合。薄锯齿形激光器技术大大改善了固体激光器的热管理,而陶瓷 Nd:YAG 增益介质有更大的尺寸,较好的介质均匀性和较高的热-机械断裂强度,这些都有利于提高固体激光器的平均输出功率。

达信公司的陶瓷激光器系统连续超越了几个技术里程碑,同时又保持了紧凑,成本低和功率可定标的特性。迄今他们已成功演示了 1kW, 5kW 和 15kW 的连续波固体激光器,公司认为研制出 100kW 的陶瓷激光器并不存在大的难题。

4.2 达信公司陶瓷激光器的技术特点

达信公司将薄锯齿形激光器光学体系结构与陶瓷 Nd:YAG 激光增益介质相结合,开辟了一条把固体激光器定标到高平均功率的独特道路。他们开发的激光器被激光器业界认为是采用陶瓷激光介质定标大功率单个模块的优胜者,它能作成可工作在苛刻作战和战场环境条件下的紧凑,简单的战场武器系统^[10]。

为了获得具有优良束质的高功率固体激光器,必须解决的关键问题是热管理,也就是控制温度和它对激光器性能的影响。达信公司激光器取得突破的关键技术,被称为薄锯齿形 (Thinzag) 概念^[11],它是根据军方的要求而开发用于防御武器所需的创新和大功率激光器技术,它提供了定向能武器应用所需的高平均功率可定标体系结构。模拟和实验已证明采用这种技术大大改善了二极管抽运固体激光器的热管理。

达信公司开发的这种独特光学布局是把薄的固体增益介质板条浸没在流动的冷却液体和一对熔氧

化硅窗之间的夹层里(如图3所示),增益介质由激光二极管阵列进行面抽运。这种光学布局先把Nd:YAG介质产生的热量转移给高热导率的熔氧化硅窗(沿光轴的方向),然后热量再通过熔氧化硅窗迅速地向外辐射进入循环的冷却液体,这种几何结构有效地排走了增益介质产生的热量,使之能获得具有优良束质的高功率激光输出。同时,激光辐射以非传统的方式“之”字形地通过增益介质,以全内反射从熔氧化硅窗外表面反射出去,而不是从激射材料外表面反射出去。这种结构就导致了具有纵横比接近于1的近场输出,而与激光板条的厚度无关。

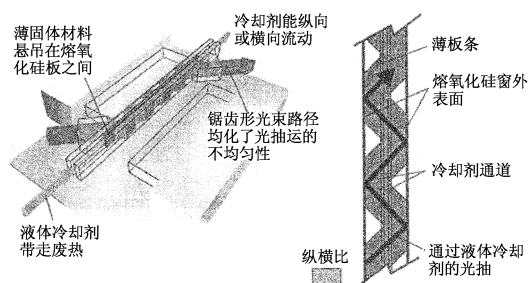


图3 薄锯齿形 JHPSSL 设计的单板条结构

从光学和热考虑,设计采用了薄的板条,使其具有类似园盘和光纤激光器容易散热的几何结构,从而缓解了热管理的问题。对板条采用面抽运的方式可以获得更加均匀的照射,使之在激活介质中产生的应力和畸变最小。这种面抽运薄板条的结构保持了平行冷却和抽运的优点,像园盘激光器的情况那样,这就减小了热梯度效应,在薄截面方向的剩余热梯度利用之字形传输被抹平了。而且这种结构可实行二极管条横向阵列的直接耦合,其优点是便于对二极管进行间接冷却,从而避免了采用微沟道热沉对二极管进行直接冷却那样,会经常造成激光二极管突然损坏。

4.3 模拟和功率定标放大

达信公司采用内部的有限元程序,对这种激光器内的热流和YAG夹层结构进行了模拟分析。他们根据增益介质中热沉积的数量计算了径向和轴向温度分布,该程序预测径向温度梯度(在固体激光器中引起热透镜效应的主要原因)比轴向温度梯度低得多。除此之外,在增益介质中温度分布的对称性限制由热引起的相位畸变仅是少量的低阶畸变^[12]。由于这些特点,使达信公司的这种激光器设计,获得了具有优良束质的高功率输出。对光束质量的实验测量证实了这些分析预测。

达信系统公司开发的高功率陶瓷激光器采用了从平均功率1kW逐步定标放大到5kW,15kW和100kW的几个发展阶段。

在计划的第1阶段,采用单个掺杂1%Nd:YAG的陶瓷板条,获得的输出功率超过1.2kW,连续工作时间60s。测量表明获得了非常好的介质控制,观察到了低阶畸变,通过采用低阶光学装置对畸变进行了校正。

第二阶段是将薄锯齿形技术定标到5kW,在这个激光器里采用了两个并排的Nd:YAG陶瓷板条。通过使板条数量加倍,增加板条长度50%和把激光二极管的抽运强度提高50%这样的定标放大,使激光器的输出功率提高了4.5倍($2 \times 1.5 \times 1.5 = 4.5$),获得了5.4kW的平均功率输出^[13]。图4给出了测得的瞬时脉冲形状,从图中可以看出最初的输出功率是5.5kW然后在以后的4s内下降到4.5kW的稳定输出工作了6s。图5是5kW陶瓷板条Nd:YAG激光器的照片。达信系统公司采用与上面类似增加板条数量,加大板条尺寸和提高激光二极管抽运功率的定标放大方法,在2005年底采用双板条组件研制出了输出功率15kW,持续工作时间10s的陶瓷Nd:YAG激光器。按照达信公司的设计,串联6个双板条组件可以产生100kW的功率。

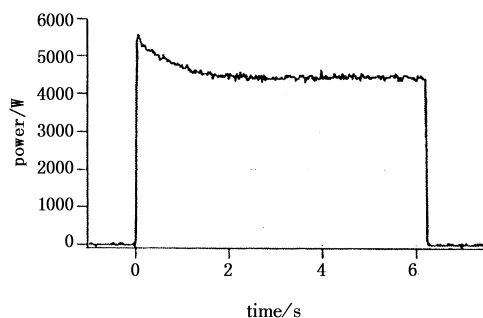


图4 5kW陶瓷激光器的瞬时脉冲

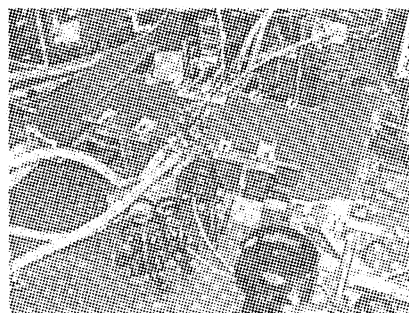


图5 达信公司研制的5kW陶瓷激光器

5 利弗莫尔实验室开发陶瓷型固体热容激光器和聚变激光器

透明陶瓷不仅具有与单晶相比的优良光学特性,而且其抗断裂性、抗损伤性和可制造性都超过了单晶,美利弗莫尔国家实验室的研究人员认为它们特别适合用于需要大块增益介质的应用中,例如激光武器和惯性约束聚变。他们正在大力发展功率更大、更紧凑、更坚固的陶瓷型固体热容激光器(SSHCL)和聚变激光器,研究人员也正在考虑并试验将这种非凡的材料用于利弗莫尔的其他激光器,例如水星激光器,这是一台大口径、具有高重复频率的高平均功率激光器,有可能用作惯性约束聚变发电厂的紧凑型激光器原型。

5.1 陶瓷型固体热容激光器创平均输出功率新记录

在 JHPSSL 计划的第二发展阶段中,利弗莫尔实验室研制的 SSHCL 可能主要是由于持续工作时间较短,而未进入该计划的第三发展阶段。但利弗莫尔并未放弃,他们仍在发展 SSHCL,并且将它转向了陶瓷激光器。由于 SSHCL 采用了一种特殊的工作模式,因而有可能成为能获得最大功率的固体激光器,甚至有可能达到兆瓦级,这是这种激光器最吸引人的特性。有关 SSHCL 的关键技术,我们在文献[1]中已分析过了,这里只讨论用陶瓷介质代替单晶介质。

在 JHPSSL 计划里,利弗莫尔实验室研制的 SSHCL 采用了新型单晶材料——掺钕的钆石榴石(Nd:GGG),它具有较好的物理和光学特性,并能生长出 20cm 直径的单晶。在 JHPSSL 计划里,利弗莫尔实验室研制了输出功率 25kW,持续时间 10s 的 SSHCL 激光器。破坏试验表明它能在 2~7s 内穿透 2.5cm 厚的钢板,这取决于光束在靶上的光斑大小。但要进一步提高激光器的功率受到限制,因为已证实难于获得更大尺寸的 Nd:GGG 毛坯,无法提供更高功率所需尺寸的板条,看来陶瓷 Nd:YAG 是解决单晶生产问题的一个办法。

利弗莫尔的研究人员与 Konoshima 公司合作获得了用于 SSHCL 的陶瓷板条,它是目前世界上具有激光品质的最大透明陶瓷板条,尺寸为 10cm × 10cm × 2cm。最近他们采用 5 个陶瓷板条的系统产生了 67kW 的平均输出功率,创造了固体激光器平均输

出功率的新记录^[14]。根据 JHPSSL 计划第二阶段 25kW SSHCL 的结构,我们推测 67kW 的 SSHCL 仍然采用了 MOPA 结构,它用单个振荡器驱动三个串联的功率放大器,每个放大器有 5 个尺寸为 10cm × 10cm × 2cm 的陶瓷板条。另外,将抽运的激光二极管阵列的占空因子提高到 20%。透明陶瓷能以简单的方式使 SSHCL 定标放大,而其他的激光器系统是通过增加激光束的数量来提高功率,所以 SSHCL 仍然是一个与功率无关的单口径系统。它可以通过下面三种方法之一线性地提高输出功率:增加放大器的板条数量;增大板条的截面积;将激光二极管的占空因子从 10% 提高到 20%。

SSHCL 需要 2cm 厚的陶瓷板条,但 Konoshima 公司原来采用注浆成形法仅能生产 1cm 厚的板条,公司提出的解决办法是在低温下把两块 1cm 厚的板条焙烧在一起,然后再利用热均衡压制将两片陶瓷在真空中烧结在一起,结果就制造出了世界上最大的具有激光品质的陶瓷增益介质板条(如图 6 所示)。不论从任何一个角度观测,几乎都看不出两块陶瓷的接缝,也不会造成任何传输损失。



图6 SSHCL 采用世界上最大的透明陶瓷板条(尺寸为 10cm × 10cm × 2cm)

在陶瓷 SSHCL 成功的基础上,利弗莫尔实验室正在设计兆瓦级的固体陶瓷激光器,新设计将采用 16 个陶瓷激光板条,每个板条的尺寸为 20cm × 20cm × 4cm^[15]。采用计算机进行的模拟已证明这个方案是可行的,这是目前唯一预测能实现兆瓦级固体激光器的技术途径。

5.2 积极开展对陶瓷增益介质的研究,将它用于聚变激光器

利弗莫尔实验室不仅在 SSHCL 里采用了陶瓷板条,而且计划在它们的聚变激光器(国家点火装置)和水星激光器(聚变发电厂的先进激光驱动器

原型)中也采用陶瓷增益介质。为此,利弗莫尔正在积极开展对陶瓷材料的研究,他们不仅与 Konoshima 公司合作获得所需的陶瓷板条,而且为了更好地了解与参量有关的关键工艺,正在亲自制造透明陶瓷的小试样,希望了解影响陶瓷板条光学特性的关键参量。

研究小组遵循日本的生产方法已制得了 15mm 直径的 Nd:YAG 陶瓷样品,他们也正在探索用新的方法制造纳米粉,已在气溶胶和凝胶制造工艺的基础上制得了最初的纳米粉。另一项在试验中的技术采用了燃烧工艺,通过燃烧含有钇、铝和钽的有机固体,然后收集产生的烟,它包含有球形纳米粒子。此外,利弗莫尔也采用包括自己开发的挤压技术来制造复杂形状的透明陶瓷件,如壳形和管形,以便改善抽运光的耦合和更有效地转移热量。

利弗莫尔也在与加利福尼亚大学合作,研究用于激光器的其他陶瓷材料,包括其他种类的氧化物和氟化物陶瓷,确定它们是否适用于利弗莫尔的激光器。聚变激光器需要产生短脉冲,锁模振荡器需要大的增益带宽(发射谱),Nd:YAG 并不适合这种应用,因为它的发射谱很窄,限制脉冲宽度为 ~5ps。Nd:YSAG [Nd:Y₃Sc_xAl_(5-x)O₁₂] 是 YAG 的一种变型,其发射谱比 Nd:YAG 宽 5 倍,并有高的抽运吸收和热导率,适合产生亚皮秒脉冲。Yb:YAG 也是一种有吸引力的高平均功率锁模激光器增益介质材料,它有大的增益带宽。Yb:SC₂O₃ 可能是更好的候选者,它的发射谱比 Nd:YAG 还宽两倍,能给出短两倍的脉冲。

6 结束语

由于透明陶瓷增益介质具有高的光学品质和热导率,以及能制成大尺寸的增益介质,而且制造成本低和制造周期短,它正在改变着激光器的设计和制造方式。多晶陶瓷激光器比单晶激光器提供了更加灵活的设计,可以很容易地控制它的光学特性,热-机械性能和光谱特性,陶瓷激光器已成为当今在输出功率和低损耗方面最好的固体激光器。可以肯定在未来的许多应用中陶瓷激光器将代替单晶激光器,特别是需要高平均输出功率的应用中。

近年来对陶瓷增益介质特性的研究和陶瓷激光器的研制都取得了重大的进展,目前已研制出了平均输出功率 67kW 的陶瓷激光器,并计划在 2009 年

实现 100kW 的固体激光器。

参考文献:

- [1] 任国光,黄裕年. 二极管抽运固体激光器迈向 100kW [J]. 激光与红外,2006,36(8):617-622.
- [2] Staff writers. Northrop grumman exceeds requirements for high power solid state laser phase 3 program [J]. Space War,2007,26:1-2.
- [3] Wisdom J, Digonnet M, Byer R L. Ceramic laser: ready for action [J]. Photonics Spectra,2004,38(2):50-56.
- [4] Ceramic laser boasts 82 percent slope efficiency [J]. Photonics Spectra,2007,41(4):14-15.
- [5] Moving from 1kW to 5kW to 15kW to 100kW solid state laser [J/OL]. www. Textron defense. com/pdf/datasheets/sslw. Pdf-April 17,2007.
- [6] Ken-ichi Veda. Progress from hybrid crystals to ceramic lasers [J/OL]. www. Laserclub. org/crystal-laser. htm.
- [7] Zelmon D E, Schepler K L, Guha S, et al. Optical properties of Nd-doped ceramic yttrium aluminum garnet [C]// Proceedings of SPIE,2005,5647:255-264.
- [8] Dubinskii M, Merkle L D, Goff J R, et al. Processing technology laser, optical and thermal properties of ceramic laser gain materials [C]// Proceedings of SPIE,2005,5792:1-9.
- [9] Northrop Grumman. Textron picked for high energy laser Program Phase III [J]. Defense Daily,2006,229(6):1-2.
- [10] Weinberger S. Defense technology international: solid-state laser; 100kW or bust; rivals vie to develop next generation of lasers [J]. Aviation week & Space Technology,2006,164(21):15-22.
- [11] Bruno M. Textron approach to new laser very different from Northrop's [J]. Aerospace Daily & Defense Report,2006,217(5):5.
- [12] Chou H P, Wang Yu-Liu, Hasson V, et al. A compact Nd:YAG DPSSL using diamond-cooled technology [C]// Proceeding of SPIE,2005,5777:354-357.
- [13] Mandl A, Klimek D E. Scaling a thinzagTM ceramic laser to 5kW [A]. 2005 Solid State & Diode Laser Technology Review, www. deps. org/DEPS Pages/SSDLTR05/high-power. Htm.
- [14] Rincon P. Record power for military laser [J/OL]. focus-mag, cc/eve/forums/a/tpc/f, February 22,2007.
- [15] Heller A. Transparent ceramics spark laser advances [J]. Science and Technology Review,2006,(4):9-16.