

文章编号: 0258-7025(2009)07-1605-14

# 高平均功率全固态激光器

周寿桓 赵 鸿 唐小军

(华北光电技术研究所固体激光国家级重点实验室, 北京 100015)

**摘要** 综述了近年来棒状、盘片、光纤和热容等高平均功率全固态激光器的进展和国内近期的工作。围绕限制激光器输出平均功率提高和激光光束质量下降的热效应问题, 比较了各类激光器的优缺点。总结了减小或补偿无用热不利影响的现有技术手段, 指出减小激光器热效应可能的技术途径。

**关键词** 激光光学; 全固态激光器; 高平均功率; 热效应

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1605

## High Average Power Laser Diode Pumped Solid-State Laser

Zhou Shouhuan Zhao Hong Tang Xiaojun

(National Key Laboratory of Solid-State Laser, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract** Current developments of high power laser diode-pumped solid-state lasers such as disk rod laser, disk/slab laser, fiber laser and heat-capacity laser at home and abroad are investigated. Focusing on the problem of thermal effects in solid-state lasers which limits the increment of the output average power and degrades the output beam quality, the advantages and disadvantages of kinds of lasers are compared. Current techniques to decrease or compensate for the effects of the useless heat are summarized, and the probable techniques to reduce the laser's thermal effects are pointed out.

**Key words** laser optics; laser diode-pumped solid-state laser; high average power; thermal effects

## 1 引 言

高平均功率高光束质量激光在军民领域都有极其广泛、重要的应用, 因而成为当前激光技术领域的研究热点之一。但是, 在固体激光器工作中, 抽运源为工作介质提供产生激光所必须的能量的同时, 伴随产生大量的无用热。为使激光器持续稳定运转, 必须及时带走这些无用热。于是导致热透镜、应力、退偏、双折射等不良效应, 这些效应使激光光束质量下降、输出功率受限, 甚至造成工作介质破坏, 严重限制了固体激光器的最大输出平均功率和亮度。

## 2 固体激光器中的有害热

激光发展初期, 曾全力以赴提高输出功率。但很快发现, 在很多重要应用场合, 亮度比输出功率更

为重要。因为激光的亮度与功率  $P$  成正比, 与光束质量因子  $\beta$  的 4 次方成反比。因此, 受不良热效应的影响, 在某一功率水平下, 随输出功率继续增加, 由于光束质量降低, 激光的亮度不增反而下降。这是长期困扰科技界的一个难题。

自 1960 年第一台激光器——气体放电灯抽运的固体激光器诞生起, 人们就在与伴随激光而产生的有害热效应进行着不懈的斗争。这是一个已经取得了重大成果, 但又没有完全解决的棘手问题。归纳起来, 进行了 3 方面的工作<sup>[1,2]</sup>:

1) 减少进入工作介质的无用热, 这是最根本也是最希望采用的方法。

已采用掺杂滤光液、吸热玻璃套、介质膜聚光腔、钾铷灯和激光二极管(LD)抽运等。其中采用 LD 抽运是迄今为止减少进入固体激光器无用热最

收稿日期: 2009-05-16; 收到修改稿日期: 2009-05-26

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60890200)和固体激光国家重点实验室基金资助课题。

作者简介: 周寿桓(1937—), 男, 中国工程院院士, 主要从事固体激光方面的研究。E-mail: zfhuan@yahoo.com.cn

有成效的一种方法。相对于传统灯抽运而言,LD抽运的固体激光器(DPSSL)中的元部件都是“固态的”,因此又称为全固态激光器。采用LD抽运大大减轻了固体激光器中的无用热,但并没有完全消除。如果能够完全消除无用热,那么固体激光器的光束质量和输出平均功率将有极大的提高。可惜,迄今还没有找到这样的方法。

全固态激光器中的无用热主要来源于工作介质中的“量子缺陷”。因此,可以从以下几方面着手以期避免或减小量子缺陷带来的无用热:(1)在现有的四能级系统中采用低热抽运途径,例如直接抽运、热助推等;(2)采用准三能级系统,其中最有名的是Yb:YAG。Yb:YAG的吸收带在941 nm,而激光跃迁在1029 nm,量子缺陷小,产生的无用热小于10%。若只考虑量子缺陷,在同样输入功率下,Yb:YAG中产生的无用热只有Nd:YAG中的1/4。但它的终端能级在基态上仅约 $600\text{ cm}^{-1}$ ,阈值高,室温下的再吸收不容忽视,对冷却、抽运功率密度、均匀性等都有很高的要求;(3)希望发展新型的工作介质(比如能实现辐射平衡),从根本上避免无用热的产生;另外,还在研究利用非线性效应(例如光参量放大)进行功率放大,因为它不是基于能级跃迁,从理论上说可以避免无用热的产生。

2)用最有效、不良影响最小的方法导出无用热。

如果不能完全阻止在工作介质中造成的无用热,那么就应采用最有效、不良影响最小的方法导出这些无用热。也就是说,散热效率应尽可能高(否则在高平均功率时,冷却系统将会很庞大),同时还应该尽力避免由于散热造成或加大工作介质中的畸变。

可以采用气体、液体、混合液、高速湍流、热管、传导冷却、微通道冷却等工作介质散热。采用这些方法已能满足很多应用需要,但不良影响很小的有效散热仍然是当前超高平均功率激光发展的一大障碍,亟待技术上有创新性的突破。

3)减少、补偿无用热造成的不利影响。

最后,上述措施都未能避免的有害热影响将造成激光光束质量下降、输出功率受限、甚至工作介质破坏等不良影响。研究人员在减少、补偿这些不良影响方面做了大量工作,取得了丰硕的成果:

(1)优化抽运结构设计,在工作介质中实现均匀的增益分布,这是获得高效率、高光束质量激光的基础;

(2)使冷却造成的热流与激光方向一致,以减小热畸变对光束质量的影响;

(3)合理设计工作介质的几何形状,以利于有效散热,例如采用管状、板条、盘片、光纤等;

(4)采用退偏补偿、损耗再利用等提高输出功率;

(5)设计合理的腔型以补偿热影响。在中小输出功率下可以通过腔型设计获得单纵模、单横模、较高平均功率的高光束质量激光;

(6)采用热容工作模式、压应力设计等提高工作介质抗热应力破坏阈值;

(7)合理设计掺杂浓度、抽运强度和分布等以减小热梯度。

(8)采用受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜、变形镜等校正光束畸变。

上述各项技术是在克服固体激光器中有害热发展起来的,其中有的已被更有效、更先进的技术所取代,有的至今仍在使用,而且不断有新的进展。

为进一步减少无用热造成的不利影响以满足对激光性能日益增长的要求,全固态激光的工作模式(如采用热容工作模式)、工作介质的几何形状(如采用盘片、光纤)都有了新的、甚至是革命性的变化,发展了多种有效的实用技术。

## 3 高平均功率全固态激光进展

### 3.1 圆棒状激光器<sup>[3~14]</sup>

高平均功率工作时,主要有3个因素限制了棒状Nd:YAG激光器的TEM<sub>00</sub>模输出功率:①热应力引起双折射,使Nd:YAG棒成为一个非单一焦距的透镜。在通常腔长下,最大TEM<sub>00</sub>模半径约为1.1 mm,而与棒的尺寸无关,因而限制了最大的TEM<sub>00</sub>模输出功率;②非均匀抽运在棒内引起光学畸变,随着抽运功率增加,这种热畸变造成的衍射损耗比增益增加更快;③棒的破裂应力限制了它所能承受的抽运强度,最终限制了输出激光功率。

因此,要获得高平均功率、高效率、高光束质量的激光输出,首要条件是要保证抽运的均匀性,同时还要保持高抽运效率。这涉及到抽运结构、强度、工作介质的掺杂浓度以及浓度分布等;其次是设法消除或补偿热致双折射,但迄今还没有找到完全补偿的方法。

用非球面透镜可以部分补偿热畸变,特别是针对某一固定的抽运功率;由于光效正比于腔内增益与损耗之比,因此采用高增益、低畸变的工作方式将有利于提高输出平均功率。据此,Y. Hirano等<sup>[14]</sup>采用细棒、强而均匀抽运的结构获得了良好的效果。细棒中的强抽运产生高增益,均匀抽运引起径向抛

物线温度分布,结果在宽的抽运范围内都近似一个没有热畸变的透镜。

图 1 是抽运结构剖面图<sup>[14]</sup>。带微柱透镜的 LD 堆积沿 4 个方向对称抽运,总抽运功率为 2.75 kW,脉冲重复频率 1 kHz。每条 LD 的快轴方向用圆柱微透镜校准,然后用非球面柱镜将抽运光聚焦成一条细线。LD 的输出经矩形平板导入漫反射聚光腔,平板造成的“空”面积仅占聚光腔内表面积的 3.7%。漫反射聚光腔用陶瓷制成,反射率大于 97%。冷却液套管用白宝石制成,内壁粗抛光。这种反射、透射型漫反射在激光棒内形成均匀的抽运光分布。对直径 4 mm,3 mm 的棒,抽运效率分别高达 72%和 63%。

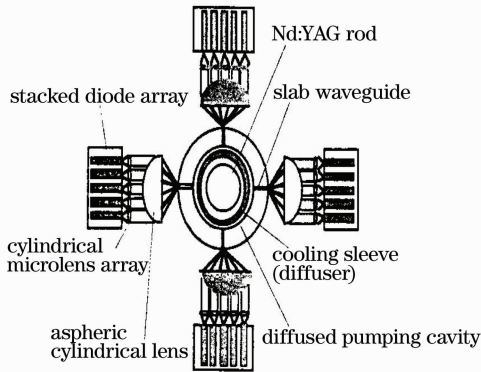


图 1 高功率低畸变抽运模块的横截面图  
Fig.1 Cross section of the high-pump-power low-aberration pump module

采用两个相同的、对称放置的激光头,其间插入石英旋转片以补偿热致双折射。为了使光束重叠最大、棒孔径的衍射效应最小,在最高抽运功率时,将

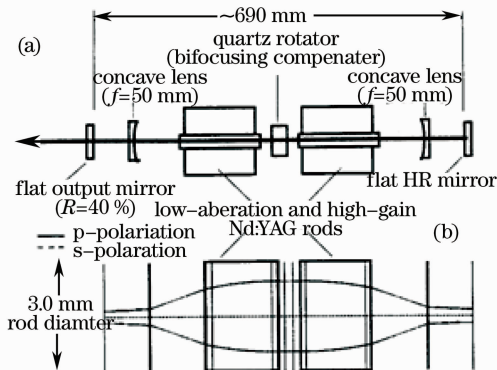


图 2 抽运功率为 1.1 kW 时 TEM<sub>00</sub> 模激光器(a)和腔内径向及切向模场传输示意图(b)

Fig.2 Schematic diagram of the TEM<sub>00</sub>-mode laser oscillator (a) and beam propagation in the resonator for both the radial and the tangential components (b) at the highest pump power of 1.1 kW

棒端面上的光束半径设计为棒半径的 1/1.4 (~1.1 mm),为此在腔内对称插入两个焦距为 50 mm 的凹透镜,如图 2 所示<sup>[14]</sup>。LD 输出 1.1 kW 时,激光输出 208 W,  $M^2 < 1.1$ 。

图 3 的结构又进一步改善了工作介质中抽运光分布的均匀性和吸收效率<sup>[6]</sup>。其关键是采用 p 偏振抽运光侧面抽运,结果圆棒表面对抽运光的反射损耗由原来的 10%降为 2%;漫反射和多次吸收形成高效率的均匀抽运,热焦距和退偏都得到改善。采用直径 4 mm,长 110 mm,掺杂 0.6%和 0.8%(原子数分数)的 Nd:YAG 棒,实验测得热透镜焦距  $f$  (m)与 LD 的输出功率  $P_{in}$  (kW)间的关系为:径向  $f_r = 0.1135 \times P_{in}^{-1.474}$ ;切向  $f_\phi = 0.1353 \times P_{in}^{-1.454}$ 。

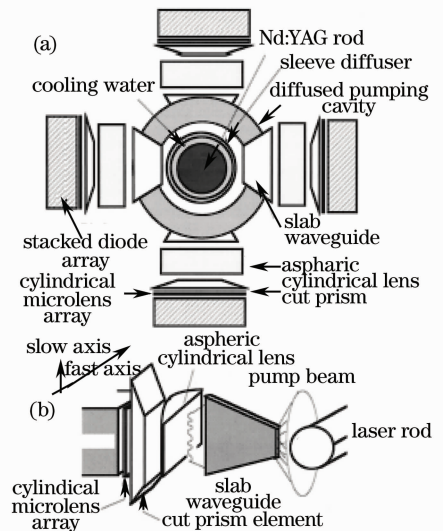


图 3 (a) HiDiCAD 聚光腔;(b)耦合光路示意图  
Fig.3 Cross section of the HiDiCAD cavity (a) and the coupling optics(b)

S. Fujikawa 等<sup>[7]</sup>采用类似的抽运结构:漫反射聚光腔,p 偏振抽运光侧面抽运,通过光劈透镜两个平行侧平面的全内反射,在快轴方向传递抽运光。因为这种结构可以把大发散角的抽运光导入漫反射聚光腔,可以采用不加装微透镜的 LD,成本降低,可靠性提高。用直径 6 mm 的 Nd:YAG 棒,两平面镜构成对称稳定腔,输出耦合度为 20%,抽运脉宽 200 μs,工作重复频率 500 Hz。输出电功率 1150 W 时,激光输出 320 W。电-光转换效率 28%,光-光转换效率 53%。

J. Chang 等<sup>[10]</sup>采用组合抛物面聚光抽运结构,如图 4 所示,声光 Q-开关,绿光输出平均功率大于 300 W,重复频率 10~20 kHz,电-光转换效率 7%~8%,激光器稳定、可靠,连续工作时间超过 40000 h。

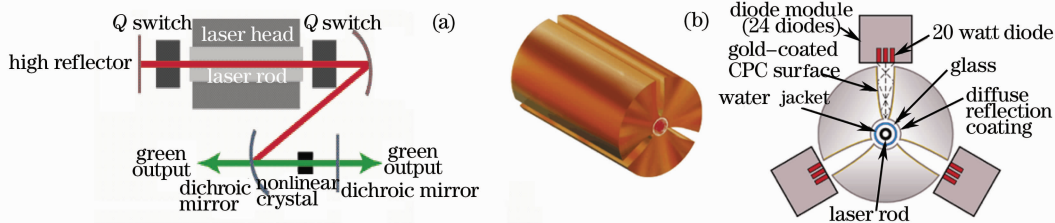


图 4 300 W 绿光激光器。(a)激光器;(b)组合抛物面聚光腔示意图

Fig. 4 Green laser with output power of 300 W. (a)Laser schematic diagram;(b)assembled paraboloid pump cavity

Y. Akiyama 等<sup>[9]</sup>采用 p 偏振抽运结构,6 根 Nd:YAG 棒串联,CW 输出 12 kW,电-光转换效率 22%。

根棒输出 2.65 kW,光-光转换效率 28%。输出 860 W 时  $M^2=2.1$ 。

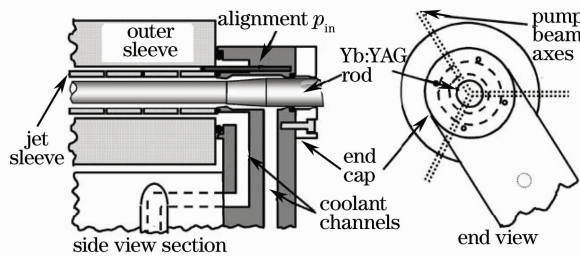


图 5 激光器抽运和冷却结构示意图

Fig. 5 Diagram detailing laser head optical pumping and cooling

图 5 是高平均功率 Yb:YAG 的实验装置<sup>[3]</sup>,单

为了证明 Yb:YAG 优良的热-光和光谱性能, D. J. Ripin 等<sup>[11]</sup>设计了相应的实验装置,如图 6 所示。他们精心设计晶体的热结构达到有效散热;将 Yb:YAG 恒温在 100 K 以消除再吸收;采用了变反射镜非稳腔提高基模输出功率;将 LD 抽运光进行空间滤波以及与腔模匹配等措施。激光器输出 165 W,  $M^2=1.02$ ,光-光转换效率 76%(用 808 nm 抽运 Nd:YAG 的最大光-光转换效率为 72%),斜率效率 85%。当然这些优良特性是在低温下获得的,如何在室温下应用以达到更加实用的目的,还有待进一步研究。

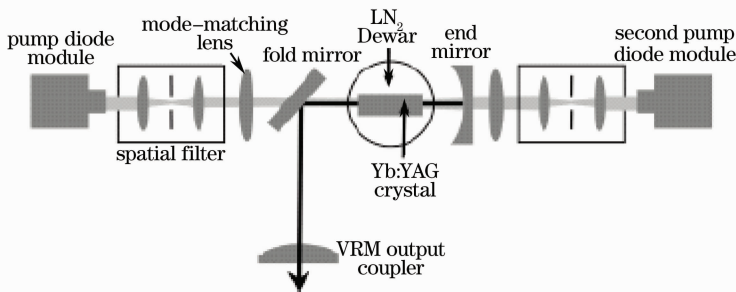


图 6 LD 端抽运可变反射射率反射镜(VRM)腔 Yb:YAG 激光器布置图

Fig. 6 Schematic of laser diode end-pumped cryogenically cooled Yb:YAG laser. (VRM: variable reflectivity mirror)

### 3.2 盘片激光器

应力双折射、热透镜等效效应使圆棒状工作介质难以在高平均功率工作的同时保持良好的光束质量。薄片<sup>[15~23]</sup>、板条<sup>[24~33]</sup>等盘片状散热特性良好,可以高平均功率工作,同时又保持较好的光束质量和偏振特性。因此成为高平均功率全固态激光器常用的结构,已经获得了千瓦、万瓦级的连续、长脉冲、短脉冲激光输出。

厚度很小,变形也小。结果,热透镜和应力双折射几乎可以忽略。采用合适的谐振腔,可同时获得高功率、高效率和高光束质量的激光输出。

为了增加工作介质对抽运光的吸收,采用多个球

A. Giesen<sup>[23]</sup>详细报道了薄片激光器的相关技术和实验结果,图 7 所示为薄片激光器的基本结构。其工作介质的厚度远小于直径,冷却通过薄片表面进行,因此在工作介质内形成垂直于表面的一维温度分布;激光振荡方向基本上垂直于表面;工作介质

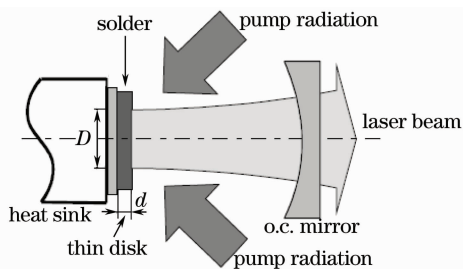


图 7 薄片激光器的基本结构  
Fig. 7 Thin disk laser design

面镜反射抽运光,使之多次通过薄片,如图 8 所示<sup>[23]</sup>。若 32 次通过薄片,则 90% 的抽运光将被薄片吸收。由于抽运光多次通过薄片,可以采用低掺杂浓度的介质,对降低薄片的热效应(如热透镜和应力)十分有利。单片输出功率大于 2 kW,光-光转换效率 64%(目前单片输出功率已达 4 kW)。输出 1 kW 的工业薄片激光器,  $M^2 < 20$ 。在一定功率密度下,增加薄片被抽运的面积可增加激光输出功率。另一个增

加输出功率的途径是增加腔内薄片的个数,图 9 是腔内 4 个薄片输出 4 kW 的激光器设计<sup>[23]</sup>。由于薄片中的热效应很小,这类激光器的另一个特点是激光的光束质量随输出功率增加而变坏的现象远不像棒状激光器那样明显。图 10 是腔内不同薄片数目时,激光器的输出与抽运功率的关系<sup>[23]</sup>。可以看出,不同薄片数激光器的斜率效率几乎一样;随输出功率增加,光束质量没有明显的变化。

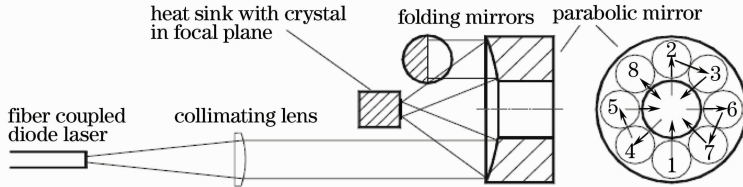


图 8 16 通薄片激光器的抽运结构

Fig. 8 Pump design of the thin disk laser with 16 pump beam passes

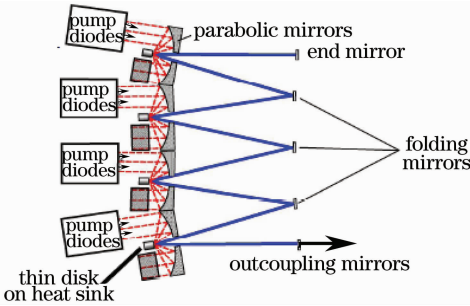


图 9 4 个薄片 4 kW 激光器示意图

Fig. 9 Design of the 4 kW thin disk laser using 4 disks

个薄片 Yb:YAG 中取出的功率可高于 10 kW。

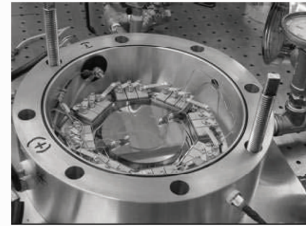


图 11 组装在热沉上的薄片激光器

Fig. 11 Composite test article disk installed on the heat exchanger

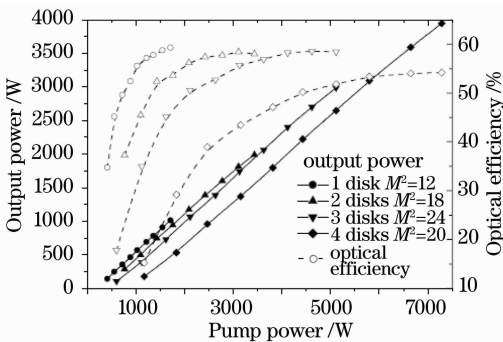


图 10 4 kW 薄片激光器的输出特性

Fig. 10 Output characteristics of the 4 kW laser

图 11 是组装在热沉上的薄片激光器实验装置,完全可以做到紧凑、牢固、可靠<sup>[18]</sup>。

采用高掺杂浓度的薄片,例如掺 Nd 的钒酸盐晶体,有可能实现几千瓦的激光输出<sup>[15]</sup>。

如果增加抽运面积,单个薄片的输出功率仅受限于自发辐射。Yb:YAG 的增益较低,自发辐射只在很高的抽运功率时才发生,对掺杂 9%(原子数分数),厚 200  $\mu\text{m}$  的晶体,连续运转的计算表明,从一

目前千瓦级薄片激光器已形成产品,与商用棒状激光器相比,在同样输出功率下,其光束质量至少要好 3 倍。而且薄片激光器的光束质量还在不断提高,结合热容量工作模式,可能发展成一代高平均功率激光器。

板条激光器中激光振荡沿 Z 字进行,可以部分抵消热致光程差和双折射等畸变对光束质量的影响,因此常应用于高平均功率高光束质量激光器。由于抽运灯的发光面积大,又是非相干光源,为了有效利用抽运功率,常常通过板条的侧面进行抽运,冷却面和抽运面是同一个表面,这是最常用的结构,如

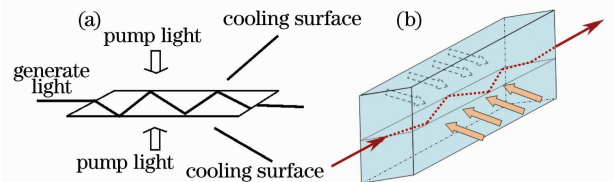


图 12 侧面抽运板条激光器(a)俯视图;(b)立体图

Fig. 12 Side-pumped slab laser. (a) Top view; (b) three dimensional picture

图 12 所示。LD 抽运也沿用了这种结构,它的一个主要缺点是因为板条必须满足一定的尺寸比,才能获得良好特性。因而采用这种抽运结构就必须在散热和抽运光吸收效率之间折衷:为了改善散热,要求减小板条的厚度,这将减少抽运光的吸收长度,使抽运效率降低。

Y. Nishikawa<sup>[26]</sup>设计的 Nd:YAG 激光器,腔内 4 块板条串联输出 6.1 kW,两个激光器偏振耦合输出 10.2 kW。

TRW 公司设计的 Nd:YAG 激光器<sup>[25]</sup>,腔内 5 根板条串联,非稳腔,输出 5.4 kW,2.4 倍衍射极限。

采用 LD 抽运则容易实现传导冷却,冷却更均匀且机械稳定性好。图 13 是一种传导冷却、边缘抽运的板条激光器的示意图<sup>[27]</sup>。理论上预计边缘抽运的 Yb:YAG 板条激光器,输出平均功率可达 100 kW。

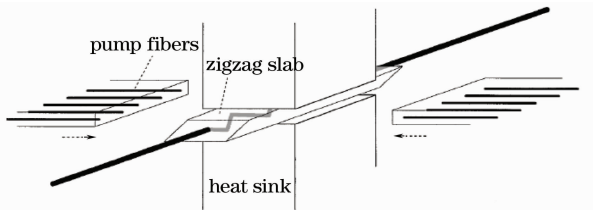


图 13 传导冷却、边缘抽运的板条激光器示意图

Fig. 13 Perspective view of the edge-pumped slab laser geometry. The conductively cooled slab is clamped in a water-cooled copper heat sink

G. D. Goodno 等<sup>[28]</sup>设计了一种新颖的传导冷却端面抽运板条(CCEPS)激光器,如图 14 所示。Nd:YAG 两端扩散键合未掺杂的 YAG,抽运光经板条端面反射从纵向进入板条,抽运光吸收长度长,如果精心设计 YAG 中的掺杂浓度,可以实现均匀、高效的抽运。板条表面镀 SiO<sub>2</sub> 膜以保护表面,并防止泄漏激光进入冷却器。板条夹在铜微通道冷却器之间,激光在晶体内沿 Z 字传播,与散热方向基本一致。

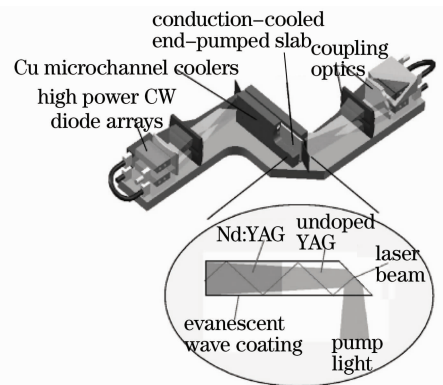


图 14 传导冷却端面抽运 zigzag 板条激光器

Fig. 14 Conduction-cooled, end-pumped zigzag slab laser

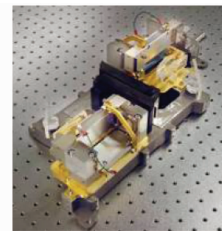


图 15 产生 4 kW 激光输出的激光二极管端抽运传导冷却板条模块

Fig. 15 CCEPS LD pumped laser gain module produces approximately 4 kW in a compact package

洛·格公司以此为基础,在输出功率、光束质量、连续运转时间、模块化、工程化方面做了大量工作<sup>[31]</sup>。每个传导冷却端面抽运 Nd:YAG 板条激光器模块输出 3.9 kW(实物照片如图 15 所示),4 个模块组成一条放大链,放大高光束质量种子激光,用变形镜校正波前畸变。2007 年实现了输出 15.3 kW,1.58 倍衍射极限,连续运转时间 300 s。2009 年用 4 条放大链相干合束,连续输出功率达 63 kW。从图 16(a)可以看出,在 300 s 内 4 链系统的输出功率具有很高的稳定性。图 16(b)所示为该 4 链激光器

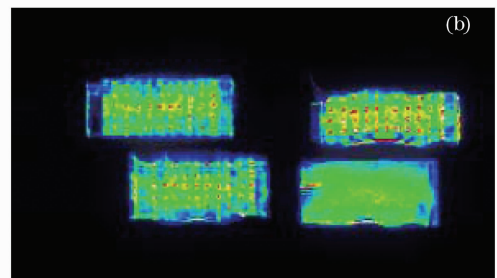
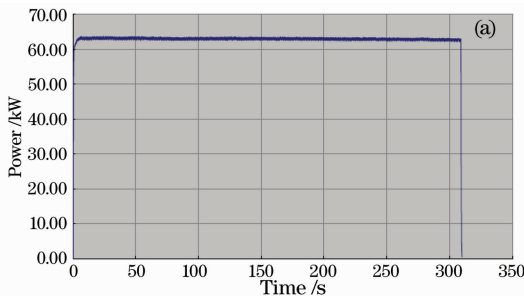


图 16 (a) 4 链输出激光功率随时间的变化曲线,表明该系统稳定和输出功率可定标放大;

(b) 4 链输出 63 kW 激光器的近场强度分布

Fig. 16 (a) Laser power versus time for the 4 laser chain demonstration showing the stability and scalability of the architecture; (b) Near field intensity pattern with 4 laser chains operating at a combined output of 63 kW

的近场强度分布。2009 年 3 月他们宣布<sup>[33]</sup>,用每链路输出 15 kW 的 7 路相干合束,输出功率达 105.5 kW,电-光转换效率 19.3%,光束质量优于 3.0,连续工作时间超过 5 min。图 17 是本振-多路功放系统结构图,采用这种相干组束的方式,总的输出功率可定标放大。这种全固态激光系统已作为美国高能激光武器的优选方案。

从图 16(b)看到,该 4 链激光器的近场强度分布并不理想,无论光束质量如何定义,但高能激光武器应用最关心的是达到目标靶上的功率(能量)密度。因此,采用多链合成的传导冷却端面抽运 Nd:YAG 板条方案,其输出功率已超过 100 kW 这个阈值,连续工作时间和输出功率的稳定性等都已能满足要求,但光束质量还有待改进。也许,这是能否成功用于高能激光武器的关键。

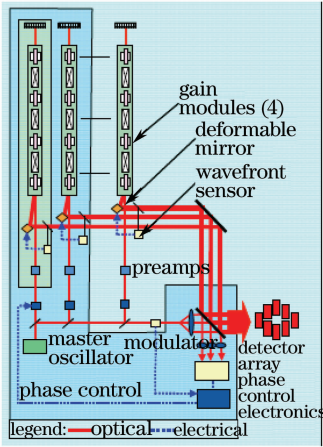


图 17 洛·格公司的高功率 MOPA 激光系统。该系统产生多束、高亮度的激光。经一束参考光提高相位调制将各束激光相干合成,因此可以定标放大到任意所希望的功率

Fig. 17 Northrop Grumman's high power laser architecture utilizes a master oscillator power amplifier (MOPA) configuration to generate multiple, high brightness laser beams. The individual laser beams are coherently combined using a phase modulated reference beam, allowing scaling to any desired power

### 3.3 高平均功率光纤激光器<sup>[34~49]</sup>

光纤激光器的工作介质极细长,这一几何形状的变化引起了质的变化,使光纤激光器获得若干重大优点。因为固体激光介质内的无用热是通过表面散出的,表面积/体积(S/V)越大,散热越有利。几个典型尺寸为例:圆棒(长 10 cm,直径 0.8 cm),S/V:5 cm<sup>-1</sup>;薄片(长 0.03 cm,直径 0.4 cm),

S/V:60 cm<sup>-1</sup>;光纤(长 2000 cm,直径 30 μm),S/V:1300 cm<sup>-1</sup>。可以看出,就同样体积的工作介质,光纤的表面积比其他块状工作介质的大 2~3 个数量级,因此散热效果良好。不仅如此,由于直径的减小,光纤成为波导结构。光纤激光的模式由纤芯直径 d 和数值孔径 d<sub>NA0</sub> 决定,一定功率范围内不受介质中无用热的影响。只要纤芯的直径和数值孔径满足基模工作条件:归一化频率  $V = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} d_{NA_0} < 2.4$ ,则输出基模激光。因此在光纤激光器中,不存在块状工作介质中的热效应影响激光光束质量的问题(纤芯功率密度在某一限度以下),这是一个极其重要的优点。在块状工作介质中,无用热限制了基模输出平均功率。输出平均功率增加,光束质量下降,严重限制了激光亮度的提高。另外,由于纤芯直径很小,容易实现均匀的高功率密度抽运,激光器效率高、阈值低。像 Yb<sup>3+</sup> 这样准三能级系统由于对抽运结构的苛刻要求,在块状激光器中还没有充分体现其优越性,在光纤激光器中得到充分的发挥。

当前连续工作光纤激光器的输出功率已经可以与块状工作介质的媲美,百瓦、千瓦级的光纤激光器比块状工作介质激光器更易获得高光束质量。但继续再增加功率就遇到困难了,特别是脉冲 Q 开关工作,其最大输出能量只有十毫焦耳量级。双包层抽运技术发明后短短几年,光纤激光器的输出功率有了突飞猛进的进展<sup>[42]</sup>(图 18),但近几年进展就明显缓慢了(2006 年后基本上没有什么大的突破)。究其原因还是纤芯横截面积太小,高能(高峰值功率)工作时造成破坏以及非线性效应等。

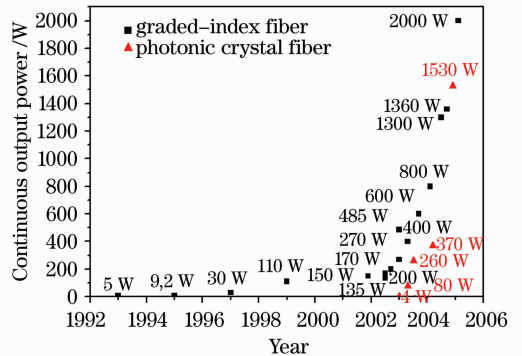


图 18 光纤激光器输出功率增长情况  
Fig. 18 Increasing situation of the output power of the fiber laser

可以用纤芯直径来估算光纤激光器可输出的最大连续功率,就当前水平,1 W/μm<sup>2</sup> 是公认安全值。要提高输出功率应增大纤芯的截面积(即直径),但

为了获得高光束质量,要求归一化频率值满足基模工作条件,因此纤芯直径又不能太大。另一个提高输出功率的途径是采用多纤串联,以及功率合成等。

2003年SPI公司与英国南安普顿大学<sup>[43]</sup>采用大模芯掺Yb光纤,纤芯直径43  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 $d_{NA_0} = 0.09$ ,归一化频率 $V$ 约11,获得1.01 kW的连续激光输出,斜率效率80%。由于纤芯直径较大,已经不是基模工作了( $M^2 = 3.4$ )。

2005年3月,IPG公司在网上公布<sup>[44]</sup>采用纤芯直径19  $\mu\text{m}$ 的掺Yb光纤,获得2 kW,  $M^2 < 1.2$ 的连续激光输出。同年<sup>[45]</sup>,他们宣称长30 m,纤芯直径200  $\mu\text{m}$ 的光纤激光器输出17 kW,光束参数积11  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。在2008年的年度报告和2009年网上公布消息称<sup>[46~48]</sup>,他们的光纤激光器最大输出已达50 kW,单频光纤激光器(YLS-5000-SM)输出5 kW,  $M^2 = 1.2$ 。因为没有详细的说明,作者猜想,他们不是用一根光纤完成的。

最初发明的高平均功率光纤激光器所用光纤是在石英玻璃中掺杂并在截面内形成一定的折射率分布,材料的不匹配会造成光纤损耗,因此纤芯和包层的折射率差不能太大。而光子晶体光纤是由单一材料构成,不存在材料不匹配的问题,调节空气孔的尺寸、间距、排列方式等可以获得较大的折射率差。可以使零色散波长移到可见波段,这在光通信上有重要的意义。而且容易获得大的抽运数值孔径和大的模面积,有利于高功率工作。最初人们担心由于纤芯周围被空气孔包围,空气的导热差而且不能采用侧面抽运结构,影响了高功率应用。然而,近几年的研究有了明显的进展,对它的散热途径和抽运结构都有了发展。一种散热途径是纤芯中的废热通过辐射和对流传到外表面,如图19所示<sup>[34]</sup>。

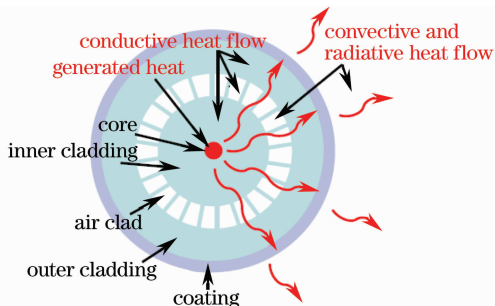


图19 光子晶体光纤可能的散热途径

Fig. 19 Illustrated heat flow mechanisms in an air-clad microstructured fiber laser

2003年,J. Limpert等<sup>[34]</sup>报道的掺Yb的大模面积光子晶体光纤,光纤长2.3 m,模面积

350  $\mu\text{m}^2$ ,纤芯的数值孔径为0.05,两端端面抽运,抽运波长976 nm,输出80 W单模激光,中心波长1070 nm,斜率效率78%。几个月后,他们把单模输出功率提高到260 W,斜率效率73%。光纤长4 m,相应单位长度光纤取出的功率为65 W/m,这已经与普通双包层光纤输出的最大功率相当了。2005年德国A. Tünnermann等<sup>[49]</sup>用掺Yb<sup>3+</sup>的双包层光子晶体光纤,内包层直径1000  $\mu\text{m}$ , $d_{NA} = 0.66$ ,掺Yb<sup>3+</sup>,芯径31  $\mu\text{m}$ , $d_{NA} < 0.07$ ,光纤长30 m。975 nm两端抽运,最大输出1.53 kW,  $M^2 < 3$ ,光-光转换效率76%。在这样高的功率下没有观察到任何热问题,于是打消了“外围空气孔影响散热”,光子晶体光纤激光器不利于高平均功率工作的顾虑。

同样,为了便于增大输出功率和插入腔内元件,希望发展侧面抽运结构。2004年,J. J. Larsen等<sup>[35]</sup>提出一种Yb光子晶体光纤激光器侧面抽运结构,如图20所示。抽运耦合效率达90%,激光器的斜率效率达81%。

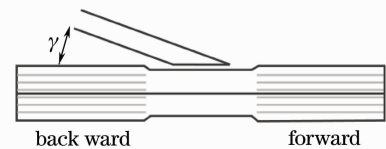


图20 光子晶体光纤侧抽运示意图  
Fig. 20 Schematic drawing of the side-pumping setup

光子晶体光纤已具备了高平均功率工作的条件,可望发展成新一代的高平均功率激光器。

原则上说,任何一类激光器单路输出功率总是有限的。为提高系统的输出功率,必须采用功率合成。对于高平均功率应用的光纤激光器,功率合成显得最为迫切。根据应用需要,功率合成可以是相干或非相干的。非相干功率合成已有比较成熟和长期的应用了。它可以是空间、时间或光谱上的叠加。例如激光聚变研究,已采用了几十,上百路的空间叠加合成。多路脉冲激光可以从时间上叠加成同一光路的重复频率更高的激光。但相干功率合成在有的应用场合更是迫切需要的。

高功率(千瓦以上)光纤的相干合成还没有实质性的突破,为了发展成武器级的应用,光纤激光器的相干合成技术已成为研究热点。但目前仅有中小功率范围的研究结果,而且相干合成后系统的复杂性大为增加。其中一个重要原因是光纤是一个对物理量极其敏感的元件,在高平均功率下控制其波面远比块状介质的难。因此,高功率(千瓦以上)新相干



合成技术的理论、实验都有待突破。

如果高功率光纤激光器相干合成技术能进入实用,将构成新一代超高平均功率激光器,特别是建成“相控阵”激光器,其意义将是不可估量的。

### 3.4 热容激光器<sup>[50~56]</sup>

2001 年 12 月在美国白沙导弹试验靶场,用激光在 6 s 内将 2 cm 厚的钢板烧了一个直径 1 cm 的洞,所花电费不到 30 美分。所用激光器是闪光灯抽运的 Nd:glass 激光器,重复频率 20 Hz,每个脉冲输出 640 J (~13 kW),  $\eta = 1.3\%$ ,其特点是采用了“热容”工作模式。这一结果大大刺激了军方的兴趣,美军计划 2007 年前建立 100 kW 固体热容激光器(很遗憾,目前还没有达到这一指标)。激光工作介质采用 Nd:GGG,重复频率 200 Hz,每个脉冲输出 500 J,  $\eta = 10\%$ ,用电池供电。激光系统结构紧凑(长 2 m,宽 < 1 m),可以装在混合用电的高机动多用途战车上。因此只要有柴油供应,整个武器系统就能投入使用,系统机动性、实战能力将大大增加。

热应力造成固体工作介质破坏,从而限制了固体激光器的最大输出平均功率。抽运光通过表面进入工作介质,冷却也是通过表面进行的。通常工作时抽运和冷却是同时进行的,工作介质表面的温度比内部的低,表面受到拉应力。热容激光器是间歇工作的,在抽运和激光发射期间不对工作介质冷却,激光发射停止后的间歇期间才对工作介质冷却,然后进入下一个循环。因此激光发射期间工作介质表面的温度比内部的高,表面受到压应力。由于固体激光工作介质抗压远大于抗拉,因此,热容模式工作时,工作介质可承受比普通工作模式高几倍的平均功率而不致因热应力造成破坏。由于间歇时间致冷,可以采用自然风冷,整体结构减小,适合某些军用场合。

热容工作模式的一个缺点是需要间歇时间以便对工作介质进行冷却。如果用已冷却的工作介质代替受热的,那么就可以缩短激光系统运转的间歇时间。

2002 年,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室<sup>[54]</sup>用 LD 抽运孔径 10 cm×10 cm 的 Nd:GGG 晶体盘片,每块盘片用 4 个 75 kW 的 LD 阵列抽运,如图 21 所示。图中,盘片与光束传播方向垂直(10 kW 玻璃热容激光器中,玻璃盘片与激光束传播方向成布儒斯特角),因此不仅系统更紧凑,热畸变引起的波前畸变也大大减小。为了达到希望的输出功率,只要简单地增加盘片的个数,或增大盘片的横向尺寸就可以了。

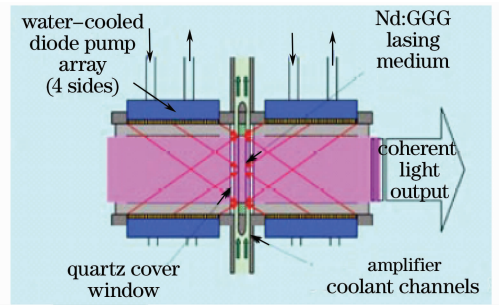


图 21 LD 抽运的 Nd:GGG 热容激光器抽运结构图  
Fig. 21 Pump schematic of LD pumped Nd:GGG heat-capacity laser

为了验证热容激光器输出功率可以定标放大的特点,他们设计了一台由 4 级模块串联而成的激光器,总的抽运功率为 1.2 MW。为了缩短冷却所需的时间,采用两组晶体轮换,处于谐振腔中的晶体工作,腔外的被冷却。将晶体从谐振腔中心位置换到冷却位置的时间小于 1 s,这样来回更换晶体,缩短了间歇时间,图 22 为实物照片<sup>[55]</sup>。采用上述措施后,获得约 30 kW(150 J/脉冲,200 Hz)的高平均功率输出,工作时间为 1 s。

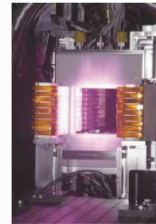


图 22 LD 抽运的 Nd:GGG 热容激光器装置照片  
Fig. 22 Photograph of LD pumped Nd:GGG heat-capacity laser

2006 年 1 月<sup>[56]</sup>,他们用 5 块 10 cm×10 cm×2 cm 的 Nd:YAG 陶瓷构成热容激光器,输出功率达 67 kW,重复频率 200 Hz,每个脉冲输出 335 J,占空比 20%(图 23)。从实验结果分析看,他们认为,采用 10 块这种激光陶瓷,输出激光功率可超过 100 kW(图 24)。



图 23 10 cm×10 cm×2 cm 的 YAG 陶瓷薄片  
Fig. 23 10 cm×10 cm×2 cm thick ceramic YAG slabs

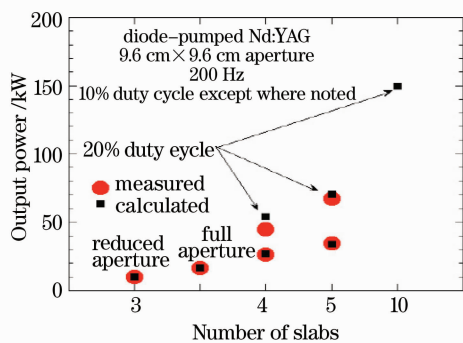


图 24 采用 5 块 YAG 陶瓷, 占空比 20% 时, 输出功率达 67 kW

Fig. 24 67 kW of output power achieved using 5 slabs @ 20% duty cycle

热容模式工作时, 不专门对工作介质进行冷却, 工程上既没有、也没有必要对工作介质热绝缘。因此虽然工作介质中的热畸变比常规模式工作的低, 但由于介质要向周围环境散热, 以及抽运的不均匀等, 必然要在工作介质中造成热畸变, 因此热容模式工作不应作为获得高光束质量的一种手段。

图 25 是波音公司<sup>[18]</sup>设计的侧面抽运紧凑盘片激光器抽运结构剖面图, 掺杂晶体盘片的外圆侧表面扩散键合不掺杂的晶体。这种结构改善了 LD 抽运光与晶体间的耦合, 有助于抽运光向晶体中心会聚。LD 阵列围绕盘片外圆排列并朝向圆心, 如有必要, 可加会聚导管和透镜系统以增加抽运功率密度。

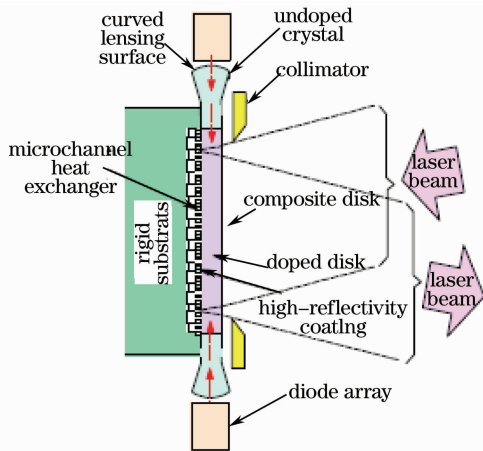


图 25 波音公司设计的 LD 侧面抽运高功率激光模块  
Fig. 25 LD side-pumped high-power laser module by the Boeing Co

为了获得高光束质量, 盘片晶体厚 1~3 mm, 直径 3~15 cm, 紧固在坚固、被冷却的底板上, 底板表面上有带微通道冷却的热交换器, 冷却液可以直接冷却激光晶体的后表面。周围的大气压和微通道中的冷却液之间的静压差将晶体紧压在底板上, 激

光发射时晶体表面承受压应力。由于采用了主动冷却, 激光器可以长时间工作。

还可以从晶体的前(后)表面进行抽运, 但这种端面抽运结构不太适用于低吸收截面的材料, 因为吸收程短(只有盘片厚度的 2 倍), 只能采用高掺杂浓度的晶体, 或者要采用复杂的多次吸收抽运系统。由于侧面抽运的吸收程较长(接近盘片的直径), 掺杂浓度可以较低, 这对某些增益介质是极为重要的。

多个这样的模块组合, 即可构成高平均功率激光器。

波音公司在提出这种设计时是希望建成 100 kW 级的高光束质量高平均功率激光器, 但目前还没有看到他们成功的报道, 也许是工艺上难度较大的原因吧。

原则上, 所有几何形状(圆棒、板条、盘片)的块状固体介质都可以热容模式工作。高光束质量高平均功率激光器(包括热容模式)大多采用盘片状工作介质, 这是因为各种瞬态光-机形变与工作介质的几何形状有关, 盘片激光介质的热特性良好, 而且可以使其形变与激光轴线方向基本一致, 因此可保持良好的光束质量, 而且通过增加盘片的面积和数量可以增加激光系统的输出功率。

热容激光方案在高能应用竞标中失败, 影响了经费的支持。迄今, 其输出功率还未达到 100 kW 的预计目标。作者认为与洛·格公司的传导冷却端抽运板条激光器相比, 工作时间短以及激光模式较难控制(激光器始终工作在非热稳定状态)可能是两个主要原因。但热容工作模式倒不失为一个启示, 为避免热效应造成工作介质的破坏, 只要设计成与热效应的联合作用的结果是在工作介质表面形成压应力, 就可以提高固体工作介质的抗破坏阈值。

### 3.5 国内研究简况

国内在高功率全固态激光器的理论、实验和工业应用方面都做了大量的工作。中国科学院上海光学精密机械研究所热容双板条输出平均功率 2.06 kW<sup>[57]</sup>。中国工程物理研究院应用电子学研究所用 7 片 Nd:YAG 盘片串联, 非稳腔输出平均功率大于 3 kW; 采用两片厚度 18 mm, 直径 50 mm 的 Nd:GGG 晶体串联放大, 输出平均功率 3.5 kW 重复频率为 500 Hz, 光-光转换效率 23%。中国科学院物理所采用侧抽运、多棒串联输出平均功率 3.79 kW; 中国科学院半导体所采用 3 棒串联, 输出平均功率 6 kW。中国科学院上海光学精密机械研究所对 Nd:YAG 热容板条的感应折射率建立了理

论模型,分析了板条介质中的温度和应力分布<sup>[58]</sup>。北京工业大学研制成功新型弹壳激光打孔机,激光器最大功率为500 W<sup>[59]</sup>。四川大学编制了高功率复合棒的热沉积、温度分布、应力分布以及应力退偏的大型计算模拟软件,薄片介质退偏特性的虚拟分析软件,分析了固体激光谐振腔的模式及失调特性,还研究了在重复频率脉冲作用下的温升和相位畸变<sup>[60~63]</sup>。

华北光电技术研究所完成了工业用 200 W 绿光、恶劣环境用高重复频率 Q-开关单纵模、高亮度 Q-开关倍频等全固态激光器样机研制。又于 2006 年 9 月,国内光纤激光器率先突破千瓦输出<sup>[64]</sup>。

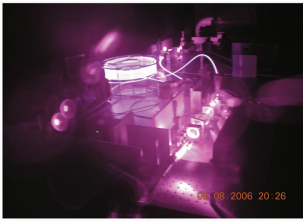


图 26 光纤激光器照片

Fig. 26 Photograph of fiber laser

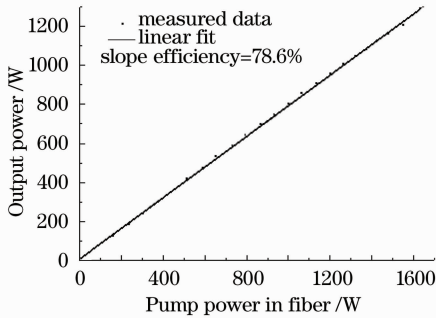


图 27 光纤激光器的输入-输出特性曲线

Fig. 27 Output characteristics of the fiber laser



图 28 热容激光器实验装置

Fig. 28 Experimental setup of the heat-capacity laser

采用 D 型 Yb 双包层光纤,抽运功率 1550 W,光纤输出 1207 W,斜率效率 78.6%,输出功率波动小于 1%。图 26 和 27 分别示出激光器和输出特性。2007 年 5 月,他们用 5 块  $\phi 68$  mm 的 Nd:GGG 串联,热容模式工作获得 8.7 kW 输出,重复频率 500 Hz,光-光转换效率 20%<sup>[65]</sup>。图 28 是热容激光

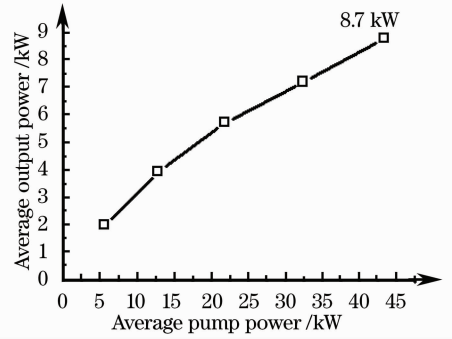


图 29 热容激光器输入-输出特性曲线

Fig. 29 Output characteristics of the heat-capacity laser

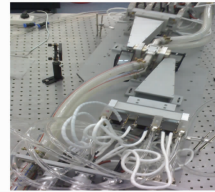


图 30 传导冷却端抽运的 Nd:YAG 板条模块

Fig. 30 Conduction-cooled, end-pumped Nd:YAG slab module

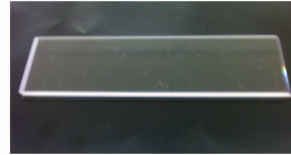


图 31 扩散键合 Nd:YAG 板条晶体照片

Fig. 31 Photograph of diffusion bonding Nd:YAG slab crystal

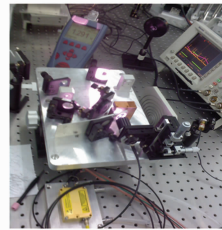


图 32 单纵模种子激光器照片

Fig. 32 Photograph of single-longitudinal mode seed laser

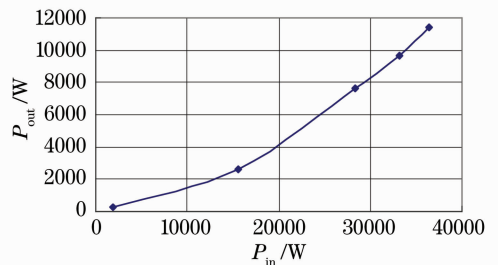


图 33 功放输入-输出特性曲线

Fig. 33 Output characteristics of the power amplifier

器实验装置,图 29 是激光输入-输出特性曲线。

2008 年,他们设计的传导冷却端抽运的 Nd:YAG 板条模块(图 30,31),单个模块对百瓦级信号实现 20 倍的放大,4 个组成的放大链。单纵模种子激光(图 32)经预放后注入放大链,在抽运功率 36.8 kW 时,输出 11.4 kW,光-光转换效率大于 30%,工作时间 100 s(图 33,34),在没有采取任何校正畸变措施的情况下,仍然获得了较好的光束质量(垂直方向  $M^2 \approx 10$ )。

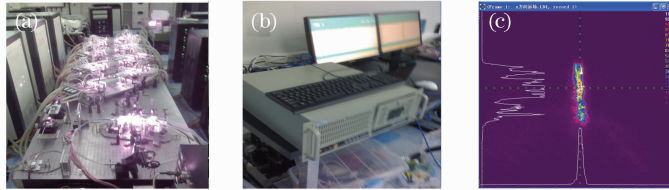


图 34 放大链实验装置(a),放大链控制器(b)和放大链输出的远场强度分布(c)

Fig. 34 (a) Experimental setup of the amplifier chain; (b) the controller of the amplifier chain; (c) the output far-field intensity distribution of the amplifier chain

## 4 讨 论

用 LD 抽运是迄今减少进入固体激光器无用热最有成效的一种方法。与传统的灯抽运相比,激光器的光束质量、效率、寿命、可靠性、稳定性都显著提高;并获得了用灯抽运所不可能达到的特殊性能;另外,一些被埋没的工作介质也能充分发挥其优良特性;还带动了一系列新型器件的研究和发展,其中最引人注目的是微型激光器、光纤激光器、热容激光器和端面抽运传导冷却板条激光器。近年,全固态激光不仅成为激光技术研究、发展中的一个热门课题,而且已经获得了大量的重要应用。但就全固态激光器本身,在减小热耗方面还有大量工作要做。

就当前技术水平,如果要输出 100 kW 激光,需要输入的电能为 436 kW,其中 336 kW 主要以热形式损耗了,即热损耗是有用激光输出的 3 倍多,如图

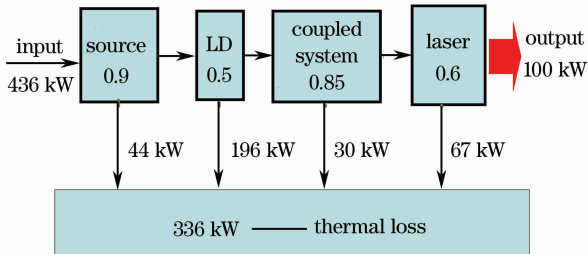


图 35 全固态激光系统各部分能量转换示意图

Fig. 35 Schematic diagram of the energy conversion among each part of the diode-pumped solid-state laser system

值得注意的是,虽然板条具有较好的热特性,但如果不解决抽运的均匀性,仍然不可能获得良好的效果。还需特别注意的是,即使抽运均匀,若介质中增益分布不均匀,高平均功率工作时仍然会造成波前畸变。因此,在抽运耦合及分布的均匀性、增益介质的动态光学均匀性、传导冷却和微通道热沉的理论分析与数值模、热管理、有源腔模场等方面都进行了初步的研究。

35 所示。在这些损耗中,LD 的损耗占 58%。因此提高 LD 的效率成为一个十分重要的课题,否则 LD 本身的散热就是一个严重的问题。国外报道 LD 的效率已达 70%,国内中国科学院半导体所、中国电子科技集团公司第 13 研究所等单位也正在积极开展这方面的工作,并已取得相当成效。

## 5 结 论

从第一台固体激光器诞生起,人们就一直与伴随产生激光的有害热效应进行着不懈的斗争。这是一个已经取得了重大成果,但又没有完全解决的棘手问题。固体激光技术的每一个重大新概念的提出,几乎都直接或间接地为了解决有害热问题;技术上每一次重大进展,几乎都直接或间接与解决有害热方面的突破有关。

随着全固态激光,SBS,变形镜、新型谐振腔以及各种补偿措施的出现,在高功率、高亮度激光领域已取得了卓越的成效,但并没有“最终”解决高平均功率工作时,随激光输出功率增加亮度非线性下降的难题,随着深入和创新性研究的开展,必然还会有新的突破。

## 参 考 文 献

- Zhou Shouhuan. Solid State Laser Technology [J]. *Laser & Infrared*, 1994, 24(4): 18~22
- 周寿桓. 固体激光技术研究 [J]. *激光与红外*, 1994, 24(4): 18~22

- 2 Zhou Shouhuan. The heat managements of the solid-state lasers [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(4): 497~509  
周寿桓. 固体激光器中的热管理[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(4): 497~509
- 3 H. Bruesselbach, D. S. Sumida. A 2.65-kW Yb:YAG single-rod laser[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 600~603
- 4 S. Lee, M. Yun, B. H. Cha *et al.*. Stability analysis of a diode-pumped, thermal birefringence-compensated two-rod Nd:YAG laser with 770-W output power [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5625~5631
- 5 A. Takada, Y. Akiyama, T. Takase *et al.*. High-efficiency operation of diode-pumped high-power Nd:YAG rod laser[C]. *SPIE*, 2000, **4065**: 782~789
- 6 N. Pavel, Y. Hirano, S. Yamamoto *et al.*. Improved pump-beam distribution in a diode side-pumped solid-state laser with a highly diffuse, cross-axis beam delivery system[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(6): 986~992
- 7 S. Fujikawa, K. Furuta, K. Yasui. 28% electrical-efficiency operation of a diode-side-pumped Nd:YAG rod laser[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9): 602~604
- 8 S. Konno, T. Kojima, S. Fujikawa *et al.*. High-brightness 138-W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2): 105~107
- 9 Y. Akiyama, M. Sasaki, H. Yuasa *et al.*. Efficient 10 kW diode-pumped Nd:YAG rod laser[J]. *Advanced Solid-State Lasers*, 2001, **33**(4): 46~49
- 10 A. Parker. High-power green lasers open up precision machining [R]. *Science & Technology Review(Lawrence Livermore National Laboratory)*, 1999, October 8~9
- 11 D. J. Ripin, J. R. Ochoa, R. L. Aggarwal *et al.*. 165-W cryogenically cooled Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(18): 2154~2156
- 12 W. A. Clarkson, N. S. Felgate, D. C. Hanna. Simple method for reducing the depolarization loss resulting from thermally induced birefringence in solid-state lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(12): 820~822
- 13 H. Yuasa, Y. Akikama, H. Takada *et al.*. High-power 10-kW all-solid-state rod-type laser[J]. *Review of Laser Engineering*, 2003, **31**(8): 508~512
- 14 Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto *et al.*. 208-W TEM<sub>00</sub> operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10): 679~681
- 15 S. Garnov, V. Mikhailov, R. Serov *et al.*. Study of the possibility of developing a multichannel-diode-pumped multikilowatt solid-state laser based on optically dense active media[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **37**(10): 910~915
- 16 C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disc laser[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 650~657
- 17 J. A. C. Terry, W. A. Clarkson. Solid State Laser Technologies and Femtosecond Phenomena [M]. London: Bellingham, Washington; SPIE, 2004
- 18 J. Vetrovec, R. S. Shah, T. Endo *et al.*. Progress in the development of solid-state disk laser[C]. *SPIE*, 2004, **5332**: 235~243
- 19 J. Vetrovec, A. Koumvakalis, R. Shah. Solid state disk laser for high-average power[C]. *SPIE*, 2003, **5120**: 731~734
- 20 J. Vetrovec, A. Koumvakalis, R. D. Shah *et al.*. Development of solid-state disk laser for high-average power[C]. *SPIE*, 2003, **4968**: 54~64
- 21 J. Vetrovec. Ultrahigh-average power solid-state laser [C]. *SPIE*, 2002, **4760**: 491~505
- 22 A. Giesen. Thin disk lasers-power scalability and beam quality [J]. *Laser Technik J.*, 2005, **2**(2): 42~45
- 23 A. Giesen. Results and scaling laws of thin-disk lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5332**: 212~227
- 24 H. Injeyan, C. S. Hoefler, S. P. Palese. End pumped zig-zag slab laser gain medium[P]. 2001, US6, 268, 956 B1
- 25 J. P. Machan, W. H. L. Jr, J. Zamel *et al.*. 5.4 kW diode-pumped, 2.4 × diffraction-limited Nd:YAG laser for material processing [J]. *Advanced Solid-State Lasers*, 2002, **68**: 549~551
- 26 Y. Nishikawa. Slab-shaped 10 kW all-solid-state laser [J]. *Review of Laser Engineering*, 2003, **31**(8): 513~518
- 27 T. S. Rutherford, W. M. Tulloch, S. Sinha *et al.*. Yb:YAG and Nd:YAG edge-pumped slab lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(13): 986~988
- 28 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1247~1249
- 29 G. D. Goodno, S. Palese, J. Harkenrider *et al.*. Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1672~1674
- 30 S. Redmond, S. McNaught, J. Zamel *et al.*. 15 kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2007: 1~2
- 31 J. Marmo, H. Injeyan, H. Komine *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719507
- 32 H. Injeyan, G. Goodno, H. Komine *et al.*. High power scalable Nd:YAG laser architecture [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2005, 1:165
- 33 B. Bishop. Northrop Grumman Scales New Heights in Electric Laser Power. Achieves 100 Kilowatts From a Solid-State Laser [J]. [http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_releases.html?d=161575](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=161575), March 18, 2009
- 34 J. Limpert, T. Schreiber, A. Liem *et al.*. Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(22): 2982~2990
- 35 J. J. Larsen, G. Vienne. Side pumping of double-clad photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 436~438
- 36 T. Loftus, A. Liu, P. Hoffman *et al.*. 258W of spectrally beam combined power with near-diffraction limited beam quality[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020S1~S8
- 37 J. Abderegg, S. J. Brosnan, M. E. Weber *et al.*. 8-watt coherently-phased 4-element fiber array [C]. *SPIE*, 2003, **4974**: 1~6
- 38 M. L. Minden, H. W. Bruesselbach, J. L. Rogers *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays [C]. *SPIE*, 2004, **5335**: 89~97
- 39 A. Shirakawa, K. Matsuo, K. Ueda. Fiber laser coherent array for power scaling of single-mode fiber laser[C]. *SPIE*, 2004, **5662**: 482~487
- 40 Y. Zhou, L. Liu, C. Etson *et al.*. Phase locking of a two-dimensional laser array by controlling the far-field pattern[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(16): 3025~3027
- 41 A. Liu, R. Mead, T. Vatter *et al.*. Spectral beam combining of high-power fiber lasers[C]. *SPIE*, 2004, **5335**: 81~88
- 42 J. Limpert, T. Schreiber, A. Tünnermann. Fiber based high power laser systems [J]. <http://www.rp-photonics.com/highpowerfiberlasers.pdf>, 2005
- 43 Y. Jeong, J. Sahu, D. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 1 kW of continuous-wave output power[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(8): 470~472
- 44 IPG. IPG Photonics Achieves Record Two Kilowatt[R]. 2005
- 45 IPG. World Premiere of Super High Power Fiber Laser at Opening of[R]. 2005

- 46 IPG. IPG Photonics Corporation[R]. 2008. 11
- 47 IPG. High Power Fiber Lasers for Industrial Applications[R]. 2009
- 48 <http://investor.ipgphotonics.com/releases.cfm>
- 49 G. Bonati, H. Voelckel, T. Gabler *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser[J]. *Photonics West, San Jose, Late Breaking Developments, Session*.
- 50 C. B. Dane. High-average-power, solid-state laser with high pulse energy and low beam divergence [R]. *Science & Technology Review(Lawrence Livermore National Laboratory)*, 1995, September; 3
- 51 M. D. Rotter, C. B. Dane, S. Fochs *et al.*. Solid-state heat-capacity lasers; good candidates for the marketplace [J]. *Photonics Spectra*, 2004, **38**(8): 44~56
- 52 J. Vetrovec. Solid-state high-energy laser [C]. *SPIE*, 2002, **4632**: 104~114
- 53 R. P. Abbott, C. D. Boley, S. N. Fochs *et al.*. High-power solid-state laser; lethality testing and modeling[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 25th Army Science Conference, UCRL-CONF-224732, 2006
- 54 C. B. Dane, S. Fochs, J. Gwo *et al.*. Solid-state heat-capacity laser for defense[R]. Laser science and technology program update 2002. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-134972-01, 2003; 16~18
- 55 R. M. Yamamoto, J. M. Parker, K. L. Allen *et al.*. Evolution of a solid state laser[C]. *SPIE*, 2007, **6552**: 655205
- 56 R. M. Yamamoto, K. L. Allen, R. W. Allmon *et al.*. A solid state laser for the battlefield[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 25th Army Science Conference, UCRL-CONF-225230, 2006
- 57 G. Mingxiu, L. Jindong, L. Wenqiang *et al.*. A kilowatt diode-pumped solid-state heat-capacity double-slab laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(9): 2530~2533
- 58 Yin Xianhua, Zhu Jianqiang, Zu Jifeng *et al.*. Calculation of induced refraction index in heat capacity slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 225~230
- 尹宪华, 朱健强, 祖继锋等. 热容型板条激光器的感应折射率计算[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 225~230
- 59 Yan Xin, Wang Zhiyong, Bao Yong *et al.*. Novel laser drilling machine for cartridge [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S1): 380~383
- 鄢 歆, 王智勇, 鲍 勇等. 新型弹壳激光打孔机的研制[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(S1): 380~383
- 60 F. Guoying, O. Qunfei, C. Jianguo *et al.*. Simulation of the thermal effects in diode-pumped rod laser [C]. *SPIE*, 2004, **5178**: 43~48
- 61 Li Gang, Feng Guoying, Li Wei *et al.*. Numerical calculation of distribution of 3D temperature and thermal stress for Nd:YAG square slice laser[J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2008, **20**(4): 557~562
- 李 刚, 冯国英, 李 玮等. Nd:YAG 方形薄片激光器3维温度及热应力的数值模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(4): 557~562
- 62 O. Qunfei, C. Jianguo, Z. Wenhui *et al.*. Thermal distortions of optics irradiated by periodically repeated short pulses[C]. *SPIE*, 2005, **6028**: 562~568
- 63 O. Qunfei, C. Jianguo, Z. Wenhui *et al.*. Phase distortions due to temperature rise of optics irradiated by periodically repeated short pulses[J]. *Optics and Laser Technology*, 2006, **38**(8): 631~635
- 64 Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen *et al.*. High power fiber laser with out power exceeding 1.2 kW[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(10): 930~930
- 赵 鸿, 周寿桓, 朱 辰等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2 kW[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(10): 930~930
- 65 Wang Chao, Zhou Shouhuan, Tang Xiaojun *et al.*. Experimental investigation on 8.7 kW laser-diode pumped solid state heat capacity laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 77~78
- 王 超, 周寿桓, 唐晓军等. LD 泵浦 8.7 kW 固体热容激光器实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 77~78