

# 高功率直接液冷固体薄片激光器的设计与实验

易家玉<sup>1,2\*\*</sup>, 涂波<sup>1,2</sup>, 曹海霞<sup>1</sup>, 安向超<sup>1,2</sup>, 廖原<sup>1,2</sup>, 尚建力<sup>1,2\*</sup>,  
吴晶<sup>1,2</sup>, 崔玲玲<sup>1,2</sup>, 苏华<sup>2,3</sup>, 阮旭<sup>2,4</sup>, 高清松<sup>1,2</sup>, 唐淳<sup>1,2</sup>, 张凯<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

<sup>3</sup>北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088;

<sup>4</sup>复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200082

**摘要** 设计了一种新型高功率直接液冷固体薄片激光器, 由数十至数百片透射薄片密集堆叠构成分布式增益系统, 使特种激光冷却液在增益介质间的平板微流道内流动以实现薄片直接冷却, 有效解决了传统高功率固体激光器中增益介质焊接于热沉引入的热致应力、焊接面变形等问题。对该激光器的腔内损耗、腔内像差等参数进行了优化设计。分析了影响光-光转换效率的关键因素, 根据像差特点给出了光束质量控制方法。将 20 片薄片以特别角度密集堆叠构成增益模块, 利用两个增益模块在稳腔和非稳腔中均实现了功率大于 9 kW 的准连续波(QCW)偏振激光输出, 且这一实验室光源的体积小于 0.4 m<sup>3</sup>。

**关键词** 激光器; 高功率激光; 固体激光; 薄片激光器; 直接液冷

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1201004

## Design and Experiment on High-Power Direct-Liquid-Cooled Thin-Disk Solid-State Laser

Yi Jiayu<sup>1,2\*\*</sup>, Tu Bo<sup>1,2</sup>, Cao Haixia<sup>1</sup>, An Xiangchao<sup>1,2</sup>, Liao Yuan<sup>1,2</sup>, Shang Jianli<sup>1,2\*</sup>,  
Wu Jing<sup>1,2</sup>, Cui Lingling<sup>1,2</sup>, Su Hua<sup>2,3</sup>, Ruan Xu<sup>2,4</sup>, Gao Qingsong<sup>1,2</sup>, Tang Chun<sup>1,2</sup>, Zhang Kai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>3</sup>Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;

<sup>4</sup>School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200082, China

**Abstract** A novel high-power direct-liquid-cooled thin-disk solid-state laser is designed, in which the distributed gain system is composed of tens or hundreds transmission disks by intensive stacking. A special kind of laser cooling liquid flows in the planar micro-channels between gain media, and thus the direct cooling of disks is realized. The thermal stress, the reflective surface deformation and so on caused by the soldering between gain media and the heat-sink in the traditional high power solid-state laser are successfully avoided. In addition, the parameters such as intra-cavity loss and aberration are optimized. The key factors influencing the optical-to-optical conversion efficiency are analyzed, and the methods for controlling laser beam quality are introduced according to the thermal aberration characteristics. A gain module is composed of 20 disks by intensive stacking with a special angle. With these gain modules, a quasi-continuous-wave (QCW) polarized laser with an output power of larger than 9 kW is obtained in both stable and unstable cavities. Moreover, the whole volume of this laser source in laboratory is smaller than 0.4 m<sup>3</sup>.

**Key words** lasers; high power laser; solid-state laser; thin-disk laser; direct-liquid-cooling

**OCIS codes** 140.3410; 140.3580; 140.3530

收稿日期: 2018-05-30; 修回日期: 2018-08-01; 录用日期: 2018-08-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(8027045)、中国工程物理研究院高新装备创新专项(AL010401)

\* E-mail: shangjianli@caep.cn; \*\* E-mail: yijiaiyu1988\_caep@163.com

# 1 引 言

高能固体激光在先进工业制造、高功率(能量)物理科学研究、能源、新概念武器等领域具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。同时实现高功率、高光束质量、高效率激光输出的技术是当前国内外固体激光研究领域的重点之一。在激光器输出性能指标提升的同时,制约激光器装置实际应用的热管理、系统规模、环境适应性等问题也越来越受到重视。随着功率的增大,激光器装置的体积和质量非线性增大;高能固体激光器系统的光学结构复杂,光学元件数量多,特别是包括大量反射型元件,在温度(梯度)变化、振动的影响下,激光光路易产生失谐,影响系统的环境适应性。

高能固体激光分为主振荡功率放大(MOPA)和单孔径谐振腔两条技术路线<sup>[4-5]</sup>。基于MOPA的板条激光最先实现100 kW激光输出,但激光头体积庞大(约为 $10\text{ m}^3$ ),光路复杂,全系统内含有超过300片反射镜,其稳健性、可靠性距实际应用还有较大差距<sup>[6]</sup>。基于单孔径谐振腔的反射式薄片<sup>[7]</sup>和ThinZag板条<sup>[8]</sup>激光分别实现了大于30 kW和100 kW的输出。反射式薄片激光器的单片增益有限,储能难以提升,功率定标放大困难,片间串接光学系统复杂,未能体现单谐振腔结构紧凑的优势;ThinZag板条激光器腔内采用多增益模块反射式双透镜成像( $4f$ 成像)串接布局,结构较复杂,因为使用了板条状增益介质,通光截面小,激光腔内激光功率密度可达到数百 $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,而总增益介质体积有限(仅使用6块Nd:YAG板条),故生热密度较大,存在光束质量随热积累难于稳定、系统不能长时间稳定运行等问题。上述两种谐振腔型高能激光器均为实验室装置,受限于其复杂的反射式串接方案,即使进行工程化、小型化设计,其功率-体积比也难有根本性突破。

近年来,高能固体激光通过增益介质构型的创新(从棒状介质到板条、薄片介质),使材料表面积-体积比增大,利用大面传导冷却实现了增益介质热管理能力的飞跃,激光器功率和光束质量有了突破发展<sup>[9-10]</sup>。但板条、薄片介质焊接于冷却器进行传导冷却的现有热管理方式是激光器进一步功率定标放大、光束质量提升、紧凑小型化的瓶颈。这一介质焊接面的存在使得介质与介质间往往需要采用反射式光束传递,复杂庞大的传递光路系统决定了激光器整体难以实现突破性的紧凑小型化。同时,链路

(或腔内)仅能串接较少的增益介质,为实现高功率输出,在每块增益介质的有限体积内需要注入尽可能高的抽运功率,在材料焊接应力和焊接后非均匀约束的影响下<sup>[11]</sup>,光学畸变的非线性增长将严重影响激光器的光束质量。

2015年,美国通用原子公司公开了其基于氟化钇锂(YLF)材料的液体激光实验结果<sup>[12]</sup>,其输出功率达到75 kW,其结构采用基于YLF材料的折射率匹配直接液冷技术方案。但是精密折射率匹配、高质量大尺寸YLF激光增益介质的制备难度极高。针对上述问题,本文提出了一种创新型的基于成熟掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)增益材料的折射率非匹配直接液冷的高能固体激光构型方式,从根本上避免了增益介质的焊接问题,也在很大程度上克服了低折射率激光增益介质制备困难的工程难题。对该构型激光器的热管理、热致像差、腔内损耗等问题开展了理论计算和分析,并搭建了实验装置,对该型激光器的输出功率(能量)等进行了验证。

## 2 新型侧泵Nd:YAG直接液冷薄片激光器构型

薄片形激光增益介质具有较大的表面积-体积比,通过大面冷却,容易获得较强的热管理能力。同时,因为介质内热传导方向即主要的温度梯度方向与激光传输方向垂直,可以有效避免显著的热透镜效应。传统的薄片激光增益介质通常为镀有高反膜的一个大面焊接于具有强对流换热系数的冷却器上,因为薄片厚度往往为毫米级甚至亚毫米级,极短的热传导距离允许增益介质工作于极大的抽运功率密度下。但是焊接应力、较高的轴向温度梯度将导致反射面的弯曲和不规则形变,从而导致显著的腔内像差。另外,激光在增益介质间反射传输的光路布局限制了腔内激光光路的紧凑化布局,在一定腔长(谐振腔尺寸规模)的限制下可以串接的薄片数量有限。

在继承传统薄片增益介质构型结构优势的基础上,设计了一种新型的薄片激光器结构,如图1所示。其中非焊接的薄片阵列被无应力地装夹于由抽运窗口、激光窗口及金属框体结构密封的腔体内,薄片的典型横向尺寸为数十毫米,厚度为 $1\sim 2\text{ mm}$ ,薄片与薄片间构成典型厚度为数百微米的平板微流道,对激光具有极低吸收的特种激光冷却液从这些流道内高速流过,并保持较高的速度均匀性和层流流场状态,对产热的激光薄片进行外掠式强制对流

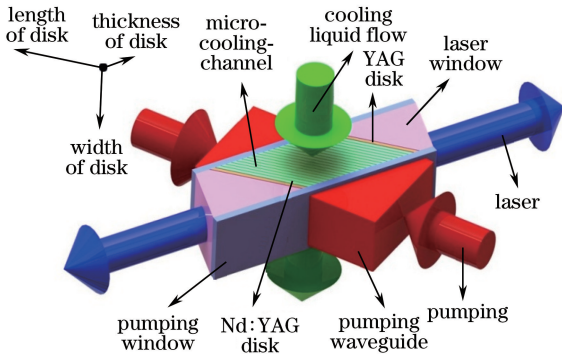


图1 抽运源、激光、流场正交布局的直接液冷薄片激光构型

Fig. 1 Orthogonal layout of pumping source, laser, and flow field in direct-liquid-cooled thin-disk laser

换热。虽然层流外掠式换热的对流换热系数远小于传统焊接热沉型薄片的等效对流换热系数,但是这种构型中,薄片为透射型薄片,可以在腔内甚至是一个腔体(增益模块)内实现紧凑的密集堆叠,即腔内串接的薄片数量很容易达到数十片乃至数百片,单个薄片的生热密度也将远低于传统焊接型薄片,因此这种冷却方式对于单口径谐振腔高功率激光器实现高效热管理是可行的。因为腔内存在数十乃至数百个介质-冷却液间的固液界面,必须有效抑制界面的菲涅耳残余反射才能实现激光器的高效运行。抑制菲涅耳反射的方法有两种,其一为实现固液的折射率匹配,在固体方面,钇铝石榴石(YAG)材料具有其他固体激光材料无法比拟的热力学、激光动力学综合性能,且其生长加工工艺成熟,但其折射率高达1.82,目前无法获得与其折射率接近且与其他性能匹配的激光冷却液;YLF材料的折射率为1.45,可以实现与几种有机激光冷却液的折射率匹配,但是其机械性能较差,并且高质量大尺寸的YLF片状材料制备困难。其二为在折射率失配条件下,通过布儒斯特角通光抑制界面损耗,这种方式在一定程度上增大了增益模块设计装配的复杂性,但是将大幅降低激光增益介质和激光冷却液的选择、制备难度。综合考虑,目前采用布儒斯特角通光对菲涅耳反射效应抑制的技术途径更易于实现,并且具有更好的工程实用前景。因此这一构型设计中,若干片Nd:YAG薄片以特定角度倾斜摆放,可满足激光以布儒斯特角通过固液界面。在抽运注入方面,从薄片大面方向注入的端抽运方式虽然容易实现较高的横向抽运均匀性,但是为了使堆叠阵列中不同位置的薄片具有接近的抽运功率密度,需要使用多种掺杂浓度的薄片介质,这将增大工程实现难度,同时也

无法通过简单增大堆叠薄片数量来实现功率定标放大。所提方案使用侧面抽运方式,经过匀化整形的抽运光束从晶体侧面入射并在其内部全反射传输吸收。虽然在负指数吸收过程中,抽运光传输(薄片宽度)方向会出现本征的产热不均匀分布,但是这种热致像差的主体为柱面离焦,容易在腔内通过简单光学元件进行有效补偿。在侧面抽运方式下,堆叠阵列中的每个薄片抽运吸收是一致的,因此仅仅通过增大堆叠薄片数量,并在保持抽运光强恒定的条件下增大注入抽运光斑的横向尺寸,就可以实现功率定标放大。

综上所述,这种新型激光器构型中抽运吸收、激光传输、冷却液流动的方向近似正交,其主要特点是利用透射薄片优势进行紧凑密集堆叠,减小单片介质的抽运功率和产热密度。阵列排布的激光增益介质浸泡于流动的激光冷却液中,实现分布式增益和分布式热管理,其优势体现在以下三个方面。1) 介质间传递距离由板条激光器的米级降低至亚毫米级,串接数量由几片提升至几百片,在数十千瓦功率水平,光源的功率-质量(体积)较板条激光器提升近一个量级;2) 在保持抽运功率密度恒定的条件下,可以在很大范围内增大薄片阵列规模(片数、尺寸)以实现功率定标放大,较低的增益介质产热密度(以本文实验为例,增益介质平均体生热密度仅为 $135 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ )和层流均匀冷却,避免了显著高阶像差的产生,可以在高功率激光输出的同时保持较高的光束质量,此外因为采用薄片构型,其增益介质内激光传输截面远大于板条激光器,在相同功率水平下,这种方案的激光功率密度比谐振腔板条激光器低一个数量级左右;3) 这种构型适合大模体谐振腔工作体制,系统光学元件少,模块化程度高,采用透射式光路,腔内几乎没有反射元件,系统稳定性高,易于工程化,具有较好的环境适应性。

### 3 理论研究仿真设计

#### 3.1 热管理分析

采用外掠式液体对流强制冷却,薄片与薄片间构成平板型微流道,典型的流道厚度为 $200 \sim 500 \mu\text{m}$ 。因为振荡激光传输中通过流动的液体,因此需要特别选择激光冷却液,避免液体对激光的明显吸收,可用的激光冷却液主要有 $\text{D}_2\text{O}$ (重水)、硅氧烷、卤代烃有机物( $\text{CCl}_4$ 等),其基本物性参数如表1所示。可以看出,三种激光冷却液各有优缺点,其中硅氧烷的折射率易与YLF激光增益介质匹配,

表 1 几种激光冷却液的主要物性参数

Table 1 Main physical parameters for several laser cooling liquids

Parameter	D <sub>2</sub> O	Siloxane	CCl <sub>4</sub>
Thermal conductivity / (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	0.63	0.15	0.11
Specific heat / (J · K <sup>-1</sup> · kg <sup>-1</sup> )	4200	1160	866
Density / (kg · m <sup>-3</sup> )	1200	992	1595
Boiling point /K	373	422	393
Reflective index	1.33	1.45	1.46
Viscosity at 293 K / (mPa · s)	1.00	28.00	0.97
Absorption coefficient @1064 nm /cm <sup>-1</sup>	0.016	0.010	0.005

在 YAG 体制内没有优势; CCl<sub>4</sub> 具有更低的吸收率, 但其显著的毒性和对有机材料的腐蚀性, 对激光器装置及实验室条件提出了较高要求; D<sub>2</sub>O 价格昂贵, 但具有和水接近的热力学性质, 具有低黏度、高导热率、更容易获得较大的对流换热系数等特点。综合这些因素, 选用 D<sub>2</sub>O 作为激光冷却液, 其在冷却界面处的对流换热系数  $h_c$  与流速  $V$  之间的关系如图 2 所示。可以看出, 相对于传统微通道冷却器的等效对流换热系数, 这种冷却方式的换热能力较弱, 虽然可以通过提高流速来提升对流换热系数, 但是因为激光通过流场, 需要保持流场的层流特征, 避免湍流涡等时间、空间上高频分布的冷却不均匀性。根据流场的层流-湍流的雷诺值判据, 在厚度为 500 μm 的流道内, D<sub>2</sub>O 流速不应超过 3 m/s, 薄片表面可以获得的对流换热系数约为 7500 W · m<sup>-2</sup> · K<sup>-1</sup>。

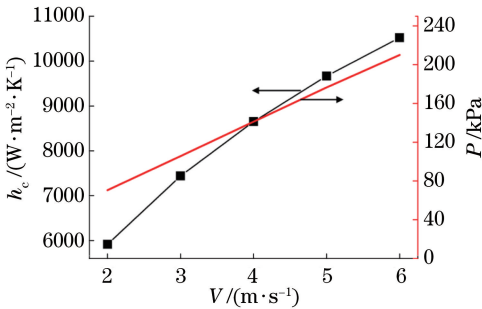


图 2 在 D<sub>2</sub>O 冷却条件下, 对流换热系数  $h_c$ 、平板微流道压降  $P$  与流速  $V$  的关系

Fig. 2 Convective heat transfer coefficient  $h_c$  and pressure drop  $P$  versus flow velocity in micro-channel

在这样的冷却能力下, 必须合理控制增益介质的产热密度。系统中存在两条设计边界, 第一条设计边界为增益介质的热应力, 采用侧面抽运方式, 抽运光入射端面具有最强的产热密度和温度梯度, 在近似自由约束条件下该处热应力最强, 即

$$\sigma_{\max} = \frac{\alpha E}{1 - \nu} \frac{Q_{\max}^{(1)} d^2}{12k} \Rightarrow Q_{\max}^{(1)} = \frac{12k(1 - \nu)}{\alpha E d^2} \sigma_{\max}, \quad (1)$$

式中: 热膨胀系数  $\alpha = 8.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ; 弹性模量  $E = 300 \text{ GPa}$ ; 泊松比  $\nu = 0.33$ ; 热导率  $k = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ; 取最大安全热应力  $\sigma_{\max} = 43 \text{ MPa}$  (Nd:YAG 的断裂应力为 130 MPa)。可见最大热功率密度  $Q_{\max}^{(1)}$  与材料厚度  $d$  的二次方成反比。

第二条设计边界为液体温升, 在无滑移假设下, 低黏度液体边界具有和速度边界层接近的温度边界层, 即边界液体流速减小, 温度升高:

$$\Delta T = \frac{dQ_{\max}^{(2)}}{2h_c} \Rightarrow Q_{\max}^{(2)} = \frac{2h_c \Delta T}{d}, \quad (2)$$

式中:  $h_c$  为对流换热系数, 取  $7500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $\Delta T$  为液体最大温升, 来流温度为 288 K, 应避免液体最高温度接近沸点, 液体温升可以接近 85 K, 为了抑制气泡产生, 应降低最高温度, 控制最高温升  $\Delta T$  在 45 K 以内。

综合考虑上述两个边界条件, 所设计的系统可承受的最大生热密度  $Q_{\max}$  与薄片厚度  $d$  的关系如图 3 所示。可以看出, 较薄的薄片具有更短的热传递距离和更高的比表面积, 可以承受更强的产热密度, 但综合考虑薄片制备加工难度、固体液体厚度匹配关系等, 设计薄片厚度为 2 mm 左右, 即最高产热密度为  $330 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$  左右。考虑倾斜摆放薄片端面处切角、抽运不均匀性等因素, 适当考虑冗余, 抽运入口处的最高产热密度被设计在  $200 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$  以下。

谐振腔内堆叠  $N$  片厚度为  $d$ 、横向面积  $S = ab$

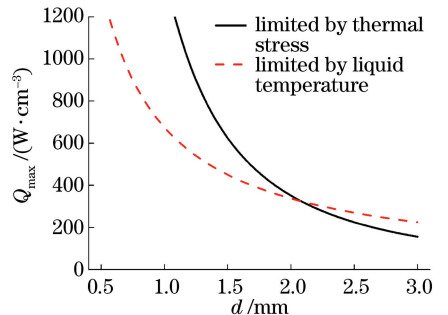


图 3 最高生热率设计边界

Fig. 3 Design limit for maximum heat generation

的 Nd:YAG 薄片,总抽运注入功率为  $P_{in}$ 。在确定材料最高产热密度边界的基础上,可以计算片数、尺寸与抽运注入功率的关系,同时横向尺寸还受限于结构强度和材料的生长加工能力。系统采用侧面抽运方式,其沿着抽运吸收方向的尺寸  $b$  还会影响抽运吸收效率。为了获得接近 95% 的吸收效率,抽运吸收长度  $b$  由与掺杂浓度相关的吸收系数  $\alpha'$  决定,即  $b \approx 3/\alpha'$ 。抽运宽度方向的尺寸  $a$  由抽运功率和堆叠片数限制:

$$\frac{P_{in} \eta_h \alpha'}{Nad} \leq Q_{max} \Rightarrow a \geq \frac{3P_{in} \eta_h}{2h_c \Delta TNb}, \quad (3)$$

式中:  $\eta_h$  为材料综合产热比,对于低掺杂的 Nd:YAG 材料,考虑一定的放大自发辐射(ASE),取工程经验值 38%。使用 2 mm 厚的薄片,产热密度  $Q_{max}$  边界受限于液体温升。可以看出,当抽运注入功率一定时,介质片数与横向尺寸乘积的最低需求相同,并且这一乘积随着抽运注入功率的增大而线性增长,即存在片数与介质尺寸的折中设计,这一问题将在 3.3 节中详细分析。

### 3.2 损耗分析

激光在振荡过程中通过数十甚至上百个固液界面,每个界面微弱的损耗便可能累积形成严重影响激光器效率的腔内往返损耗。腔内损耗主要由以下几个部分构成:增益介质的吸收散射损耗  $l_{sa}$ ,根据材料制备质量,单片损耗约为 0.02%;流道液体的本征吸收损耗  $l_{la}$ ,根据激光冷却液的种类和质量,单个流道损耗的理论值约为 0.05%;退偏损耗  $l_{dp}$ ,根据产热和冷却条件,可以利用有限元方法和光弹效应原理计算介质的退偏效应,在最高生热密度为  $200 \text{ W/cm}^3$  的条件下,退偏后垂直偏振光(s 光)的分布如图 4 所示。计算表明,主要的退偏出现在介质的四角处,单片介质的热致退偏振小于 0.02%,考虑到实际装置中的装夹应力以及液体管流压降带来的不均匀压力,保守估计退偏损耗为 0.1%;激光透光角度较理想布儒斯特角偏离引起的角度失调损耗  $l_a$ ,这一偏离与增益介质装配精度及谐振腔调试精度相关,损耗与偏离角度的具体关系如图 5 所示;在热加载条件下,介质、冷却液热光效应导致布儒斯特角变化引入的损耗  $l_t$ ,因为介质、冷却液的热光系数相差近 2 个数量级,并且激光冷却液往往表现出负热光效应,这部分损耗与界面温升的关系如图 6 所示;除此之外,还存在液体空化效应气泡、固液界面纳米气泡、激光传输中衍射效应、光学元件残余反射、散射等损耗  $l_o$ 。



图 4 增益介质退偏振后的 s 光分布

Fig. 4 s-polarization light distribution for gain medium after thermal depolarization

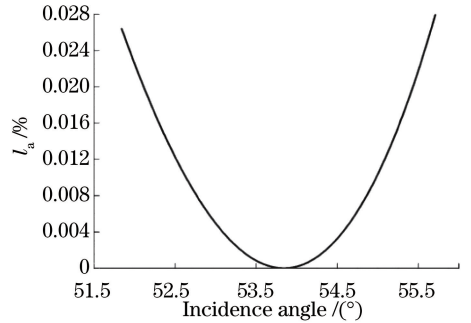


图 5 布儒斯特角偏离与单片损耗的关系

Fig. 5 Single disk loss versus Brewster angle deviation

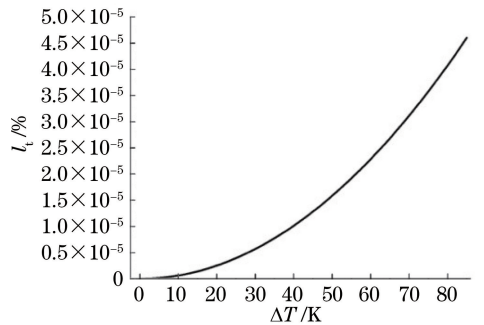


图 6 热光效应引入的单片损耗

Fig. 6 Single disk loss introduced by thermo-optic effect

从上面的分析可以看出,激光冷却液性能、退偏效应、装配精度等是影响单片损耗的主要因素,腔内往返损耗  $L$  可以简单评估为

$$L = 1 - [(1 - l_{sa})(1 - l_{la})(1 - l_{dp})]^{2N} \times [(1 - l_a)(1 - l_t)]^{4N} (1 - l_o). \quad (4)$$

腔内往返损耗与堆叠片数的关系如图 7 所示,可以看出,在不根本改变激光冷却液性能的条件下,随着堆叠片数的增大,往返损耗显著增大。

### 3.3 激光动力学分析

当抽运功率即热负载恒定时,在热管理设计边界的约束下,需要折中优化增益介质的片数与横向尺寸。随着片数增大,可以使用更小的介质,由此获

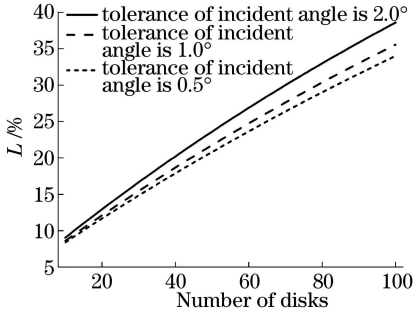


图 7 腔内往返损耗与片数的关系

Fig. 7 Round-trip loss versus number of disks

得更长的增益长度和更高的往返增益,但腔内损耗随之增大。当片数减小时,损耗降低,增益长度减小。考虑 ASE 效应的影响,根据速率方程计算不同尺寸、片数条件下的输出功率  $P_{out}$ , 计算过程为

$$P_{out} = \frac{1-R}{R-r} \frac{1}{8A_1\rho} \times \{ [(1-r)(1+\rho^2) - \sqrt{A_1}(1+r)(1-\rho^2)] \times \sigma(0) - 2\rho(1-r)A_2 \}, \quad (5)$$

式中:  $R$  为激光器的耦合输出率;  $r$  为 ASE 在耦合输出镜上的反射率,一般为 20%。其他参数为

$$\begin{cases} A_1 = 1 + 2Ac / (1 - c)^2 \\ A_2 = 4A / (1 - c) \\ \rho = \sqrt{R} \sqrt{A_1} \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $A$  为关于自发辐射强度的参数;  $c = \alpha'' / g_0$ , 其中  $\alpha''$  为损耗因子,  $g_0$  为小信号增益系数。  $\sigma(0)$  的计算公式为

$$\ln \left[ \frac{2\sqrt{A_1}}{\sqrt{A_3^2 - c^2\sigma^2(0)}} \times \frac{(1+\rho^2)A_3 - 2\rho\alpha(0) + (1-\rho^2)\sqrt{A_3^2 - c^2\sigma^2(0)}}{2\rho A_3 - (1+\rho^2)c\sigma(0)} \right] = \alpha''K + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{R} \right), \quad (7)$$

式中:  $K$  为单程增益长度,  $K = Nd$ ;  $A_3 = 2[(1-c) + 4Ac / (1-c)]$ 。参数  $A$  的计算公式为

$$A = \frac{d\Omega}{4\pi} \frac{\tau_u}{\tau_s} \frac{\Delta\nu_n}{\Delta\nu_s}, \quad (8)$$

式中:  $\tau_u$  为激发态寿命;  $\tau_s$  为增益介质的荧光寿命;  $\Delta\nu_s$  为自发辐射光谱带宽;  $\Delta\nu_n$  为 ASE 带宽;  $d\Omega / 4\pi$  为 ASE 的平均立体角,其计算公式为

$$\frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{1}{2\rho_0} (1 + \rho_0 - \sqrt{1 + \rho_0^2}), \quad (9)$$

式中:  $\rho_0$  为增益介质的纵横比,  $\rho_0 = K / D_0$ , 其中  $D_0$  为晶体的横向尺寸,  $D_0 = (a^2 + b^2)^{1/2}$ 。  $D_0$  与 ASE

直接相关,  $D_0$  越大, ASE 越严重。 ASE 带宽与自发辐射光谱带宽之比为

$$\frac{\Delta\nu_n}{\Delta\nu_s} \cong \left( 1 + \ln G + \frac{g_0 L}{g_0 / \alpha} \right)^{-1/2}, \quad (10)$$

式中:  $G$  为腔内增益系数。

谐振腔等效反馈率  $R'$  在非稳腔中的典型值约为 0.25。在热负载受限于液体温升的条件下,输出功率与单片厚度无关。在占空比为 12.5%、平均功率为 42 kW 的准连续波(QCW)抽运下(抽运耦合效率为 90%),不同单片损耗条件下的输出功率与片数的关系如图 8 所示。可以看出,单片损耗是该类型激光器效率的关键影响因素,更低的效率适合使用更多的小尺寸薄片以获得更高的输出功率。综合考虑工程中损耗抑制能力(单片损耗约为 0.3%)、薄片制备难度、系统规模和抽运耦合难度,选择薄片数量为 40 片,单片尺寸为  $17.5 \text{ cm}^2$  ( $3.5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ )。在不同等效耦合输出率下,激光器输出功率如图 9 所示。可以看出,因为非稳腔具有较高的耦合输出率,激光器阈值较高,直到最大抽运功率时(热管理边界),其光-光转换效率仍处在爬升阶段;不同放大率非稳腔即不同耦合输出率对应的阈值有所不同,但斜效率接近。故该类型激光器需要重点降低单片损耗,增大串接片数,提升抽运功率,增大往返增益,以适应高放大率非稳腔工作。

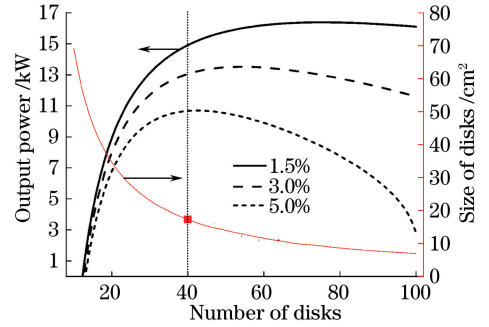


图 8 不同单片损耗下输出功率与薄片堆叠数量的优化关系  
Fig. 8 Output power versus number of disks at different loss of single disks

### 3.4 腔内像差与补偿

在均匀抽运和冷却的理想条件下,激光器仍存在明显的固有像差,在抽运方向上,采用双面侧泵,负指数吸收的叠加产生一维像差  $f_{OPD}$ ,其可以近似表示为

$$f_{OPD}(z) \propto \frac{3I\eta_b d}{2bh_c} \left[ \exp\left(-\frac{3z}{b} - \frac{3}{2}\right) + \exp\left(\frac{3z}{b} - \frac{3}{2}\right) \right], \quad (11)$$

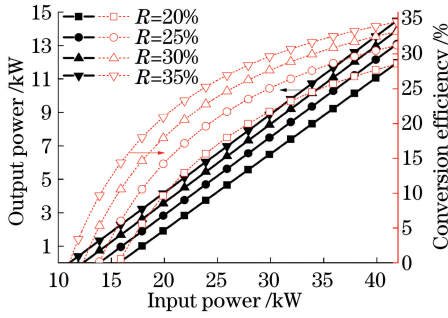


图 9 输出功率与光-光转换效率

Fig. 9 Output power and optical-to-optical conversion efficiency

式中： $z$  为吸收长度； $I$  为吸收功率。

对(11)式进行泰勒展开可以得到,其主体为二次函数即离焦项,离焦外的残差主要为较小的类球差项,如图 10 所示,其峰谷值( $f_{PV}$ )约为整体像差的 4%。在近似条件下解析计算或通过有限元分析均可估算获得这种抽运方式引起离焦的焦距,当堆叠片数较多时,这一柱面离焦焦距达到 10 m 量级,对于腔长典型值为 1~2 m 的非稳腔,这一离焦像差将显著改变非稳腔的耦合输出率、交叠效率和损耗,最终影响光-光转换效率和光束质量,文献[13]详细分析了非稳腔内离焦像差的影响和补偿方法。设计的非稳腔内产生的热致发散型柱面离焦影响与插入

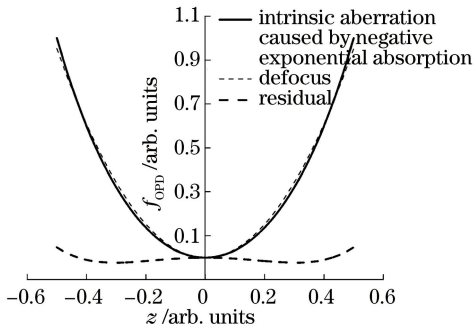


图 10 侧面抽运产生的热致像差

Fig. 10 Thermal aberration under side-pumping

补偿元件的效果如图 11 所示,其中  $R_1$  为凹镜曲率,  $R_2$  凸镜曲率。可以看出,虽然这种抽运方式引入了较强的柱面离焦,但补偿后该离焦对非稳腔内振荡激光的影响较小。

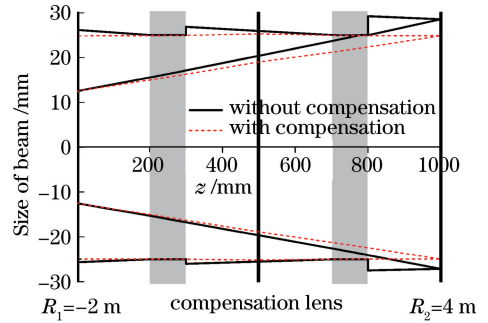


图 11 腔内柱面离焦的影响与补偿

Fig. 11 Influence and compensation of intra-cavity cylindrical defocus

在冷却方面,采用外掠式强制对流冷却,激光冷却液在平板微流道内伴随着层流发展、黏滞层增厚、液体温度升高等效应,相对出口区域,来流区域具有更大的对流换热系数和更低的冷却液温度,即在流动方向上存在本征的热致像差。利用商用计算流体力学(CFD)软件,基于湍流理论  $k-\epsilon$  模型,在理想抽运吸收和理想来流速度均匀性的假设下,在固液耦合条件下计算增益介质、激光冷却液的温度分布,根据热光效应,获得  $f_{OPD}$  分布如图 12(a)所示,其中  $x$ 、 $y$  分别为横、纵坐标。可以看出,在流动方向上存在明显的倾斜像差,其中倾斜量接近 1 mrad,这样的热致倾斜将导致明显的谐振腔失谐,降低输出功率和激光器的稳定性。针对这一问题,可以在腔内放置偶数个相同的增益模块,在本设计中,两个增益模块各堆叠 20 片增益介质,分别注入抽运功率为 21 kW 的抽运光,并使两个增益模块激光冷却液的流动方向相反,如图 12(b)所示,实现对该方向倾斜像差及奇次幂分布像差的自补偿,补偿后腔内像差如图 12(c)所示。

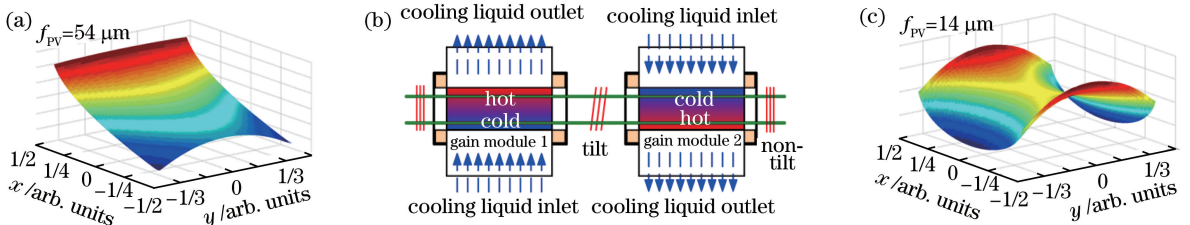


图 12 流场致热致倾斜及倾斜自补偿。(a)同向流动腔内像差分布;(b)倾斜自补偿结构示意图;(c)自补偿后腔内像差分布  
Fig. 12 Thermal aberration caused by cooling flow field and tilt self-compensation. (a) Intra-cavity aberration distribution under same flow direction; (b) schematic of tilt self-compensation; (c) intra-cavity aberration distribution under opposite flow direction

对理想条件近似计算获得的像差分布进行频域分析,单片介质像差的 Legendre 展开系数分布如图 13 所示,可以看出,最大像差为倾斜(0,1)和两个方向离焦(2,0)(0,2)。去离焦倾斜后,高阶像差的  $f_{PV}$  值约为  $6.3 \mu\text{m}$ ,其中两个三次项较大,主体像差最高阶次为 7 阶(第 33 项)。在分析中各片像差线性叠加,实际上,非稳腔内往返光束具有不同的尺寸,通过各像屏叠加后产生新成分的像差:

$$\Phi'(r, \theta) = \Phi_1(r, \theta) + \Phi_1 \left[ \left( 1 - \frac{z_1}{L} + \frac{z_1}{LM} \right) r, \theta \right], \quad (12)$$

式中: $r$  为光斑半径; $\theta$  为光斑发散角; $\Phi_1$  为初始像差; $z_1$  为传输距离; $M$  为放大率。若考虑光束通过像屏后的光束偏折,将演化出更高阶的次像差。针对其中部分像差成分,可以通过非稳腔内像差非共轭补偿方法进行主动补偿,以提升输出激光的光束质量<sup>[14]</sup>。

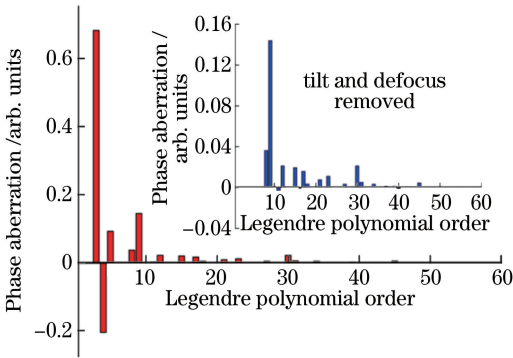


图 13 像差的 Legendre 多项式展开

Fig. 13 Legendre polynomial expansion of phase aberration

在实际情况下,抽运不均匀性、来流速度不均匀性、流场边界效应、装配误差导致的冷却不均匀性、扰流及局部湍流等,均会与热效应、腔内振荡激光相互耦合形成复杂的高时间、空间频率像差<sup>[15-16]</sup>,这些像差是难以补偿的。其中,来流液体的均匀性以及液体在流动过程中的均匀性变化导致的液体温度分布变化是影响光束质量变化的关键因素,在系统中,冷却液流过增益模块后的整体温升小于 2 K,因此即使出现了流场的不均匀性,对光束质量的影响也很有限。在更大的激光系统中,流场的均匀性及其变化规律更为重要,通过初步理论计算,在 100 kW 的浸入式激光系统中,增益介质区域内的流场均匀性必须大于 98%,相关的表征以及实验验证工作也是下一步的工作重点。

### 3.5 液体吸收影响

在浸入式液冷固体激光器中,冷却液的选取首

先要保证对激光和抽运光的高透性,但是其对激光以及抽运光的残余吸收不可避免。通过抽运耦合系统的优化设计以及抽运光的精密调节,可以尽量减小抽运光在液体中的传输距离。在系统中,通过设计抽运光的入射角度,使得抽运光在晶体中全反射传输,部分照射在液体中的抽运光会在较短距离内( $\sim 1 \text{ mm}$ )进入晶体中形成全反射,且  $\text{D}_2\text{O}$  对 808 nm 抽运光的吸收极低(吸收率约为  $0.005 \text{ cm}^{-1}$ ),因此在激光系统中液体对抽运光的吸收处于较低水平,不会造成抽运效率的明显减小,对输出功率和光束质量的影响也较小。

激光在振荡的过程中会多次经过 44 个流道,单次在液体中传输的距离大于 2 cm,因此必须考虑液体对激光的吸收,这不仅会造成激光能量的损耗,吸收产热还会引入额外的热致相差。当冷却液对激光的吸收较小时,其影响主要是增大了谐振腔内损耗,激光输出功率减小,等效于激光介质插入损耗的增大。当液体吸收激光产热贡献的热致相差不可忽略时,波前畸变将使腔内激光强度分布的不均匀性增强,引起激光输出光斑光束质量的退化。由于液体流动-热-激光振荡的耦合过程极其复杂,其瞬态演化过程变得重要。

对于  $\text{D}_2\text{O}$  冷却液,当液体流速为 4 m/s 时,激光穿过流道的特征时间为 8.5 ms,在此时间内热扩散的特征尺度仅为  $3 \times 10^{-3} \text{ cm}$ ,小于计算网格尺寸,因此计算温度场时可以忽略横向热扩散,近似认为温度为沿流线呈一维分布。一维非稳态传热方程可表示为

$$\rho C \left( \frac{dT}{dt} + u \frac{dT}{dx} \right) = Q, \quad (13)$$

式中:流场速度  $u$  为常数; $Q$  为液体吸收激光产热的功率密度; $T$  为温度; $t$  为时间; $\rho$  为液体密度; $C$  为热容。取冷却流层厚度为 0.05 cm,液体吸收系数  $\alpha_{\text{liq}} = 0.01 \text{ cm}^{-1}$ ,光腔内介质片数为 20,图 14 所示为某一时刻单流层的温度分布、20 个流层累积的  $f_{\text{OPD}}$  分布以及对应的输出光斑强度分布。可以看出,虽然吸收产热引起的单流层温升在 0.1 K 量级,但是随着流层数目的增大,累积相差的影响不可忽略,20 个流层累积  $f_{\text{OPD}}$  的均方根(RMS)达到  $0.11\lambda$ ,其中  $\lambda$  为波长。相差结构以沿流动方向的倾斜为主,但是沿展向具有较高的空间频率;在迭加了液体的流动效应后,与腔内激光振荡的耦合将导致激光输出的动力学不稳定性。

以放大率  $M = 2.0$  的非稳腔为例,给出了不同



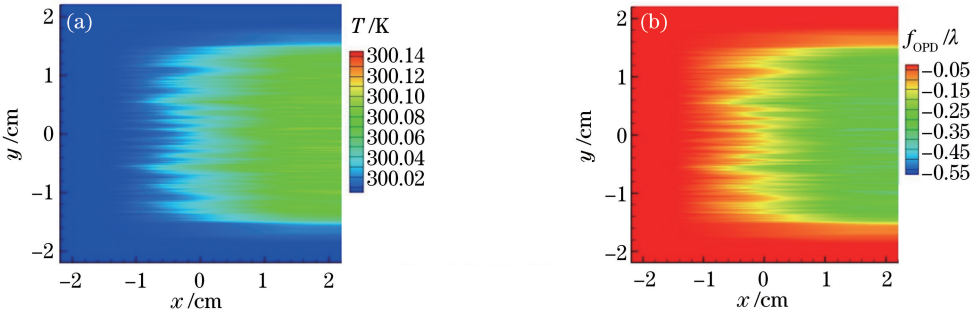


图 14 液体吸收激光后导致的温度、 $f_{OPD}$ 的典型分布。(a)单流层液体的温度分布;(b) 20 个流层引起的  $f_{OPD}$   
Fig. 14 Typical distributions of temperature and  $f_{OPD}$  due to laser absorption by liquid. (a) Temperature distribution of liquid with a single layer. (b)  $f_{OPD}$  of liquid with 20 layers

液体吸收系数  $\alpha_{lqd}$  和不同介质片数下光束质量  $\beta$  和输出功率的瞬态演化规律,如图 15 所示。当  $\alpha_{lqd} = 0.01 \text{ cm}^{-1}$  时,若介质数目小于 50,则光束质量  $\beta$  可保持在 2 左右且不随时间改变;若介质片数大于 100,在 3 ms 内  $\beta$  即可退化到 20 以上。此外,激光输出动力学的不稳定性存在明显的阈值特征,即只有当累积相差(由液体吸收系数和流层数目决定)达到阈值时,才会引起时域上的振荡;当累积相差小于阈值时,系统工作在稳定状态。由图 15 可知,当  $\alpha_{lqd} = 0.01 \text{ cm}^{-1}$  时,介质片数的阈值约为 100。

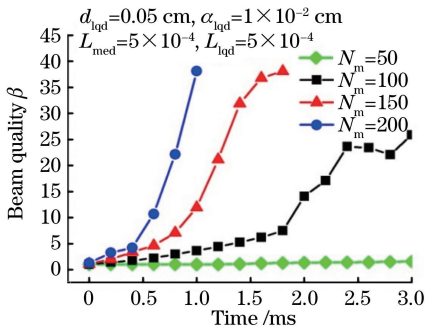


图 15 液体吸收激光产热引起的  $f_{OPD}$  对光束质量瞬态演化的影响

Fig. 15 Effect of  $f_{OPD}$  due to laser absorption by liquid on transient variation of laser beam quality

综上所述,液体吸收激光产热与腔内激光振荡的耦合会造成激光器的自相位调整现象,导致激光功率和光束质量的严重退化。由于吸收无自饱和机制,且随时间呈非线性增长,故该耦合过程导致的波前畸变无法补偿,必须从初始设计上加以抑制。

## 4 实验研究

实验装置如图 16 所示,谐振腔内放置了两个增益模块,每个增益模块内各堆叠 20 片  $50 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的 Nd:YAG 薄片,薄片与薄片之间

为  $500 \mu\text{m}$  厚的平板流道。D<sub>2</sub>O 作为激光冷却液以 3 m/s 的速度在流道内流动,实现对薄片的冷却。薄片具有特别的切角,将其浸泡于 D<sub>2</sub>O 液体中时振荡激光满足布儒斯特角通光。介质的 50 mm 长度方向为抽运吸收方向,利用增益介质与激光冷却液之间的折射率差,经过整形后的抽运光以特定角度入射时可以实现增益介质内的全反射。每个增益模块单侧注入平均功率为 10.5 kW 的抽运光,为了提高增益,采用 QCW 工作体制,占空比约为 12.5%,重复频率为 500 Hz,脉宽约为 250  $\mu\text{s}$ ,输出激光的截面尺寸约为  $27 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ 。非稳腔内两个增益模块激光冷却液的流动方向相反,以实现热致离焦的自补偿,并在腔内放置了柱面离焦补偿镜,实现了对像差主体成分柱面离焦的预置补偿。相比于传统固体激光器,这一实验装置具有紧凑化优势,激光头部分的体积不大于  $0.4 \text{ m}^3$ 。

稳腔和非稳腔实验获得的输出激光单脉冲能量和光-光转换效率如图 17 所示,在很低的抽运频率下,即低热条件下,耦合输出率为 75% 的稳腔和放大率为 2.0 的非稳腔均能获得 20 J 以上的单脉冲能量,并且光-光转换效率始终处于爬升段。但与理论计算结果(图 9)相比,实验所获得的光-光转换效率偏低,这可能是因为实验上采用 QCW 抽运方式,理论计算未考虑每个抽运脉冲初始阶段激光未振荡时的 ASE 能量损失;理论计算中未考虑交叠效率,实验中高放大率非稳腔中的交叠效率没有进行有效优化;实验中激光冷却液存在一定的污染和变性,往返损耗略大于理论估计值。非稳腔阈值与稳腔等效耦合输出率相同,其阈值接近,但非稳腔的斜效率低于稳腔,其主要原因是非稳腔的交叠效率明显小于多模稳腔。另外,非稳腔中每个脉冲初始阶段第一个弛豫振荡激光尖峰的产生时间也略长于稳腔。

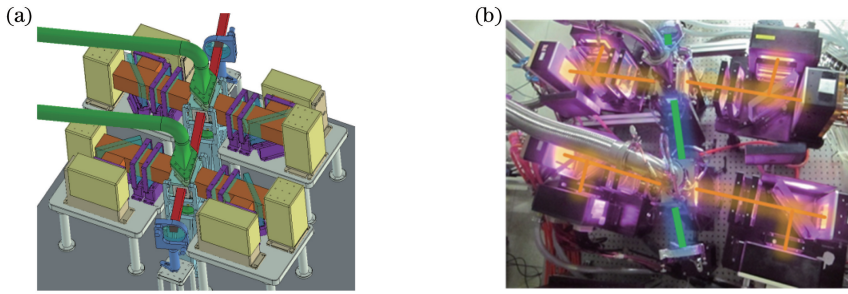


图 16 直接液冷固体薄片激光器的实验装置。(a)设计示意图;(b)实验系统出光图  
Fig. 16 Experiment device of direct-liquid-cooled thin-disk solid-state laser. (a) Design diagram;  
(b) output picture of the laser system

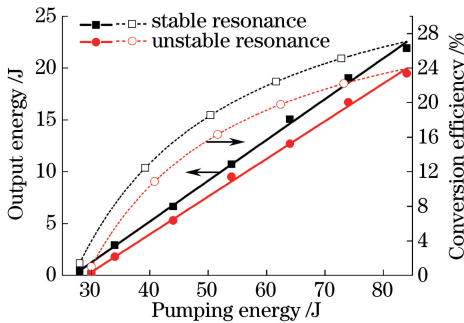


图 17 输出单脉冲能量和光-光转换效率  
Fig. 17 Output single pulse energy and optical-to-optical conversion efficiency

提高重复频率,得到装置的输出平均功率特征如图 18 所示,稳腔和非稳腔均实现了大于 9 kW 的激光输出。采用布儒斯特角通光设计,谐振腔内 s 光的损耗远大于平行偏振光(p 光)的,薄片的退偏损耗较小,因此输出线偏光,其中稳腔的光-光转换效率大于 26%。随着重复频率的增大,产热和热致像差效应增强,稳腔可以保持几乎恒定的单脉冲能力,即功率线性增长。但在非稳腔内,若无柱面离焦补偿,热致柱面离焦会导致非稳腔损耗、交叠效率等恶化,效率不断下降。经过腔内柱面离焦补偿后,

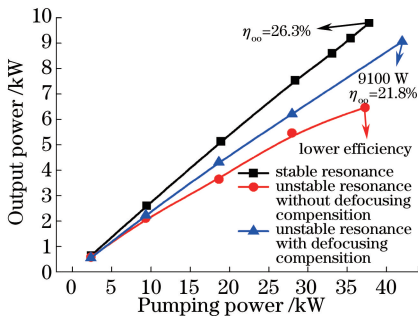


图 18 不同抽运功率下装置的输出平均功率特征  
Fig. 18 Average output power characteristics under different pumping powers

光-光转换效率的减小有明显改善,但仍存在一定下滑,即从低热状态下的约 24%减小至 21.8%,其原因主要是未对热致高阶像差进行有效补偿,高放大率非稳腔具有远大于平凹稳腔的模式鉴别能力,即其对腔内像差更加敏感。同时,高阶次腔内像差导致输出激光的光束质量不理想,其  $\beta$  值在 20 以上。因此,在下一步的工作中,将重点通过提升抽运、冷却均匀性来降低热致高阶像差强度和采用腔内主动像差补偿技术来解决这一问题,在提升输出激光光束质量的同时,提升非稳腔激光器的光-光转换效率。

## 5 结 论

将数十至数百片 Nd:YAG 薄片密集堆叠,薄片与薄片间构建亚毫米的平板微流道,特种激光冷却液在流道内以层流形式流动,实现了对薄片的冷却。通过特别设计薄片角度,使振荡激光以布儒斯特角通过固液界面以降低界面损耗,即可以使用与激光介质折射率失配的具有高热力学和光学性能的激光冷却液。这种新型高功率激光器构型方式可实现分布式增益和分布式冷却,继承了薄片激光增益介质比表面积大、主要温度梯度与激光传输方向一致等优势,克服了传统片状激光介质焊接引入的一系列静态和动态问题。使用侧面抽运方式,每片薄片获得了相同的抽运注入,降低了大量介质堆叠的工程实现难度。这种新型构型利用透射薄片密集堆叠可使激光头较传统构型具有显著的紧凑化优势。

这种构型中,增益介质产热边界同时受限于介质热应力和液体温升,使用  $D_2O$  冷却 Nd:YAG 材料,最高生热密度约为  $200 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。在这样的热管理条件下,单片介质的退偏损耗不大于 0.02%;因为固液界面较多,单介质、单流道及单界面的损耗累积会严重影响激光器腔内损耗,单界面损耗增大 0.1%,腔内往返损耗增大近 15%。在高放大率非稳

腔中,单片介质的综合损耗(退偏损耗、固体液体吸收损耗、界面损耗等)是光-光转换效率的决定性因素。在相同抽运功率下,若单片介质损耗由0.5%减小至0.3%,则可以通过增大堆叠片数、降低介质横向尺寸以获得更高的往返增益,光-光转换效率提升约35%。该型激光器的像差主体为流场冷却引入的倾斜和两侧抽运引入的离焦,在设计装置中,经倾斜自补偿和离焦补偿后高阶像差的 $f_{PV}$ 约为 $6.3\ \mu\text{m}$ ,但实际中存在计算未考虑的流场及流-光-热耦合导致的高时空频率像差。搭建了堆叠40片Nd:YAG薄片的直接液冷激光器装置,稳腔和非稳腔均获得了大于9 kW的输出功率,光-光转换效率在稳腔中大于26%,在非稳腔中约为22%。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou S H, Zhao H, Tang X J. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618.  
周寿桓, 赵鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1605-1618.
- [2] Kuhn V, Gottwald T, Stolzenburg C, *et al.* Latest advances in high brightness disk lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9342: 93420Y.
- [3] Li J M. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(7): 16-29.  
李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(7): 16-29.
- [4] Tang C. Review on high brightness high average power solid-state laser technology [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(4): 488-496.  
唐淳. 高亮度高平均功率固体激光器技术评述[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 488-496.
- [5] Chen J B, Guo S F. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602006.  
陈金宝, 郭少锋. 高能固态激光器技术路线分析[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602006.
- [6] Ren G G, Huang Y N. Diode pumped solid-state laser stride forward 100 kW [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(8): 617-622.  
任国光, 黄裕年. 二极管抽运固体激光器迈向100 kW [J]. 激光与红外, 2006, 36(8): 617-622.
- [7] Avizonis P V, Bossert D J, Curtin M S. Physics of high performance Yb: YAG thin disk lasers [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum electronics and Laser Science, 2009: CThA2.
- [8] Mandl A, Klimek D E. Textron's J-HPSSL 100 kW ThinZag © laser program [C]. Conference on Laser Science to Photonic Applications, 2010: JThH2.
- [9] Giesen A, Speiser J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 598-609.
- [10] An X C, Tang C, Shang J L, *et al.* 10 J diode-pumped thin-disk laser in unstable resonator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0802001.  
安向超, 唐淳, 尚建力, 等. 10 J级二极管抽运非稳腔薄片激光器 [J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802001.
- [11] Cai Z, Wang X J, Jiang J F, *et al.* Study of uniform pumping and uniform cooling on thin disk laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(10): 2437-2440.  
蔡震, 王小军, 蒋建锋, 等. 薄片激光器均匀抽运及均匀冷却技术研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2437-2440.
- [12] General Atomics and Affiliated Companies. Hellads laser completes development [EB/OL]. [2018-08-21]. <http://www.ga.com/hellads-laser-completes-development>.
- [13] Shang J L, Yu Y, An X C, *et al.* Influence and compensation of intra-cavity defocusing in unstable resonator Nd: YAG thin-disk laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0102005.  
尚建力, 于益, 安向超, 等. 非稳腔Nd:YAG薄片激光器腔内离焦的影响和补偿 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102005.
- [14] Cai H D, Shang J L, Su H, *et al.* Research of non-conjugated aberration compensation in passive unstable resonator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1102005.  
蔡海动, 尚建力, 苏华, 等. 无源非稳腔内非共轭像差补偿研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1102005.
- [15] Su H. Study on coupling dynamics in high-power solid state lasers with unstable cavity [D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2015.  
苏华. 非稳腔式高能固体激光器中的耦合动力学研究 [D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2015.
- [16] Wang K, Tu B, Shang J L, *et al.* Kilowatt-level immersed and direct-liquid-cooling Nd:YAG multi-disk laser resonator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0801002.  
王柯, 涂波, 尚建力, 等. 千瓦级浸入式直接液冷Nd:YAG多薄片激光谐振腔 [J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0801002.