

# 千瓦级浸入式直接液冷 Nd:YAG 多薄片激光谐振腔

王柯<sup>1,2,3</sup>, 涂波<sup>2,3</sup>, 尚建力<sup>2,3</sup>, 安向超<sup>2,3\*</sup>, 易家玉<sup>2,3</sup>, 于益<sup>2,3</sup>,  
廖原<sup>2</sup>, 吕文强<sup>2</sup>, 叶志斌<sup>4</sup>, 杜近宇<sup>1,2</sup>, 高清松<sup>2,3</sup>, 张凯<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

<sup>3</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>4</sup>衢州学院电气与信息工程学院, 浙江 衢州 324000

**摘要** 介绍了一种工作在准连续状态下的直接液体冷却的侧面抽运 Nd:YAG 多薄片激光谐振腔, 装置中选用 20 片 Nd:YAG 薄片作为增益介质, 由激光二极管阵列在其侧面进行抽运, 流动的硅氧烷溶液作为冷却液在其端面进行冷却, 振荡激光以布儒斯特角穿过多层薄片和冷却液实现增益。设计了层流冷却流场并通过数值模拟验证了其对来流不均匀性的耗散能力。根据之前报道的层流冷却能力测量实验建立数值模型, 模拟了流场的冷却效果, 实验结果证明了模型的置信性, 进而基于模型对激光器中薄片的热安全性进行了评估。在抽运能量为 49.9 J 时, 获得了 15.7 J 的最大脉冲能量输出, 对应光-光效率和斜率效率分别为 31.4% 和 39.2%; 在抽运脉宽为 250  $\mu$ s, 重复频率为 100 Hz, 平均抽运功率为 5 kW 时, 获得了 1440 W 的平均输出功率。

**关键词** 激光器; 薄片; 谐振腔; 直接液体冷却; 浸入式激光器

**中图分类号** TN248.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0801002

## Kilowatt-Level Immersed and Direct-Liquid-Cooling Nd:YAG Multi-Disk Laser Resonator

Wang Ke<sup>1,2,3</sup>, Tu Bo<sup>2,3</sup>, Shang Jianli<sup>2,3</sup>, An Xiangchao<sup>2,3</sup>, Yi Jiayu<sup>2,3</sup>, Yu Yi<sup>2,3</sup>,  
Liao Yuan<sup>2</sup>, Lü Wenqiang<sup>2</sup>, Ye Zhibin<sup>4</sup>, Du Jinyu<sup>1,2</sup>, Gao Qingsong<sup>2,3</sup>, Zhang Kai<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;

<sup>2</sup>Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang, Sichuan 621900, China;

<sup>4</sup>College of Electrical and Information Engineering, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China

**Abstract** A direct-liquid-cooling side-pumped Nd:YAG multi-disk laser resonator works in quasi-continuous state is presented, in which twenty Nd:YAG thin disks side-pumped by laser diode arrays are directly cooled by flowing siloxane solution at the end surfaces, while oscillating laser propagates through multiple thin disks and cooling flow layers in Brewster angle. The laminar flow cooling flow field is designed to cool the thin disk. The dissipation capability of the inhomogeneity of the incoming flow is verified by numerical simulation. According to the experiment reported before, a numerical model based on laminar flow is built to measure the cooling ability of the flow field. The experimental result verifies the reliability of numerical model, the thermal safety of the thin disk in laser device is evaluated based on the model. The maximum pulse energy output of 15.7 J is obtained at the pump

**收稿日期:** 2017-02-15; **收到修改稿日期:** 2017-03-29

**基金项目:** 国家 863 计划(2015AA8027045)

**作者简介:** 王柯(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: maons@live.cn

**导师简介:** 张凯(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: zhangkai217@sohu.com

\* **通信联系人.** E-mail: 394879114@qq.com

energy of 49.9 J, corresponding to an optical-optical efficiency of 31.4% and a slope efficiency of 39.2%. The average output power of 1440 W is achieved at the pump pulse width of 250  $\mu\text{s}$ , repetition frequency of 100 Hz, and average pumping energy of 5 kW.

**Key words** lasers; thin disk; resonator; direct-liquid-cooling; immersed laser

**OCIS codes** 140.3410; 140.3580; 140.3615

## 1 引 言

具有高增益、低波前畸变的多薄片介质串接是固体激光器获得高功率、高光束质量输出的主要方法之一<sup>[1-2]</sup>。采用直接液体冷却方式的高效热管理使激光增益介质能够承受较高的抽运功率密度<sup>[3-5]</sup>,同时其柔性装夹方式可以有效避免传统薄片激光器中由热沉焊接引起的波前畸变<sup>[6-9]</sup>。因此,直接液冷多薄片固体激光器逐渐成为研究热点<sup>[9-10]</sup>。

近年来已有关于直接液冷多片介质高功率固体激光器的报道,其中最引人注目的是美国通用原子公司报道的 50 kW 级液体激光器,但其技术细节没有公开<sup>[11]</sup>。2014 年,清华大学 Fu 等<sup>[12-13]</sup>报道了一种弹性装夹的直接液冷多板条激光振荡器,采用 Nd:YAG 作为增益介质、重水作为冷却液,在稳腔提取下获得了 3006 W 功率输出,并在此基础之上,于 2015 年提出一种 30 kW 级激光谐振腔设计方案。2015 年, Ye 等<sup>[14]</sup>研制了一套直接液冷端面抽运的 Nd:YLF 薄片激光器,使用以硅氧烷聚合物为主要成分调配而成的、与 Nd:YLF 激光介质折射率相匹配的冷却液以抑制激光介质与冷却液体之间的界面损耗,获得大于 1 kW 的平均输出功率。

目前关于浸入式激光器的公开报道多基于端面抽运结构,这是因为端面抽运时,相对容易实现增益介质的均匀抽运,从而使因不均匀抽运带来的波前畸变得以抑制。然而,为了使每片介质获得相近的抽运功率,要求每片介质具有不同的掺杂浓度,随着介质数量的增加,掺杂要求逐渐提高,薄片的加工难度大大增加。而对于侧面抽运方式,当薄片介质有同样的掺杂浓度时,每片介质具有相同的抽运功率密度,变得相对容易实现。

本文介绍了一种使用硅氧烷溶液作为冷却液的千瓦级直接液冷 Nd:YAG 多薄片激光谐振腔。振荡激光以布儒斯特角穿过激光与冷却液的界面以抑制界面损耗,采用侧面抽运方式避免了端面抽运方式中的抽运光与激光的交叠,大大降低了系统的复杂度以及因插入多色镜所带来的激光损耗。计算了介质温升导致固液界面布儒斯特角变化引入的界面损耗;基于流体力学中的层流模型设计了层流冷却流场,数值模拟验证了其对来流不均匀性的耗散能力;根据本课题组之前报道的关于层流冷却能力测量的实验建立了数学模型,模拟了充分发展的层流流场的冷却效果,模拟结果证明了模型的置信性。基于层流模型,使用 Fluent 软件对激光谐振腔内晶体的热安全性进行了评估。激光器在准连续模式下运转,抽运脉宽为 250  $\mu\text{s}$ ,当抽运能量为 49.9 J 时,使用透过率为 55% 的输出镜可获得最大能量为 15.7 J 的激光脉冲输出,对应的光-光效率为 31.4%;当重复频率为 100 Hz 时,获得了 1440 W 的平均输出功率,对应的光-光效率为 28.7%。

## 2 实验设置

图1为直接液体冷却的侧面抽运 Nd:YAG 多薄片激光谐振腔的装置示意图。增益模块(GM)由 20 片薄

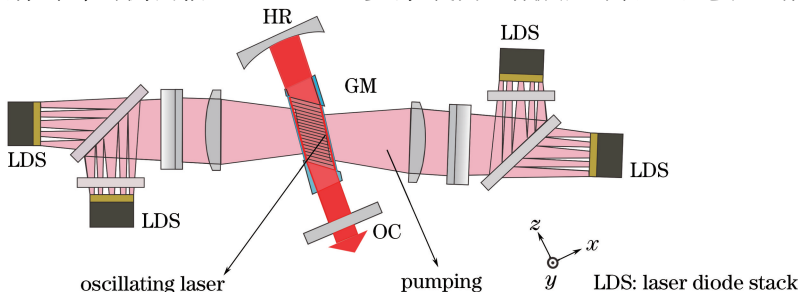


图 1 直接液冷侧面抽运 Nd:YAG 多薄片激光谐振腔原理图

Fig. 1 Schematic of direct-liquid-cooling side-pumped Nd:YAG multi-disk laser resonator

片增益介质、22个冷却流道及4个石英窗口构成。20片Nd:YAG薄片以0.5 mm的间距线性排列并浸没在冷却液中,4个激光二极管叠阵在其侧面并对其进行抽运。振荡激光以布儒斯特角(51.1°)穿过薄片与冷却液的界面,硅氧烷溶液作为冷却液充满冷却流道,并沿y轴流动。薄片掺杂的原子数分数为0.25%,端面尺寸为27 mm×38 mm,相应的激光孔径为27 mm×25 mm。薄片的6个面均未镀膜,激光窗口与空气接触的一面镀厚度为1064 nm的抗反射膜,与冷却液接触的一面未镀膜。抽运窗口与空气接触的一面镀厚度为808 nm的抗反射膜,与冷却液接触的一面未镀膜。GM的尺寸为150 mm×96 mm×88 mm。激光谐振腔采用了平凹腔,它由一个全反射镜(HR,对波长为1064 nm光的反射率 $R_s > 99.9\%$ ,曲率半径 $R_{HR} = 2$  m)和一个耦合输出镜(OC)构成,腔长 $L = 350$  mm。

### 2.1 界面损耗

为了减小由界面反射带来的损耗,对激光光路进行优化,使振荡激光以布儒斯特角穿过增益介质和冷却流体之间的界面,因此只有p偏振的激光可以在腔内振荡。Nd:YAG晶体因其优异的热、机械、光学以及激光性能而被广泛应用,在此选作增益介质材料<sup>[15]</sup>。硅氧烷是一种硅-氧-硅键构成主链结构的聚合物,它对抽运波长(808 nm)和激光波长(1064 nm)均有较低的吸收系数。以硅氧烷为主要成分,加入参芳香族化合物、卤代烃等成分配制得到了硅氧烷溶液,此溶液无毒、无腐蚀性,且利于储存,成本低廉,在此用作冷却液体。经过测试,其物性参数如表1所示。

表1 冷却液的参数

Table 1 Parameters of cooling liquid

Parameter	Description
Composition	Siloxane etc.
Toxicity/Corrosivity	None
Pour point /°C	< -22
Boiling point /°C	> 149
Flash point /°C	> 121
Refractive index	1.47
Absorption coefficient /cm <sup>-1</sup> (at 808 nm and 1047 nm)	< 0.01
Viscosity /(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	28×10 <sup>-6</sup>
Thermal conductivity /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.147
Specific heat /(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	1160
Thermo-optical coefficient /K <sup>-1</sup>	-4.1×10 <sup>-4</sup>

尽管振荡激光以布儒斯特角穿过Nd:YAG薄片与硅氧烷溶液之间的界面,但因光轴失调而引入的界面损耗依然存在。图2(a)为界面损耗与偏移角 $\phi$ 的关系,插图为激光穿过多片介质和冷却液时单通界面损耗随激光片数的变化。可以看到,虽然穿过单个固液界面时的激光损耗很小,但它随着增益介质数目和偏移角度的增加逐渐变得可观<sup>[3]</sup>。图2(b)为硅氧烷与Nd:YAG界面布儒斯特角随表面温升的变化。当界面温升

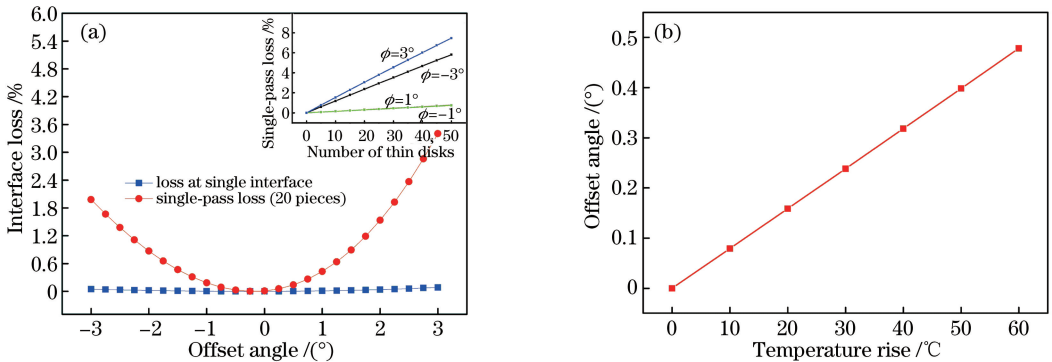


图2 界面损耗特性。(a)界面损耗随偏移角的变化;(b)布儒斯特角随温升的变化

Fig. 2 Performance of interface loss. (a) Variation in interface loss with offset angle;

(b) variation in Brewster angle with temperature rise

为 50 K 时,硅氧烷溶液折射率减小 0.0205, Nd:YAG 折射率增大 0.0037, 相应的布儒斯特角(冷却液至薄片)增加 0.4°, 由图 2(a)可以看出相应的 20 片介质单通损耗约为 0.1%, 计算结果表明实验装置中温升所导致的界面损耗并不严重。

### 2.2 冷却流场设计及验证

在直接液冷侧面抽运薄片激光器的通光区域,冷却流道是由相邻两片增益介质与窗口玻璃围绕而成的管道,在管道中流动的液体的运动状态直接影响了其冷却能力和冷却均匀性。为了得到较好的冷却均匀性,使用充分发展的层流流场对薄片介质进行实时冷却。

充分发展层流流场的实现仅需在流体进入激光孔径前加装一段平直的流道,称为入口段。层流的入口段通常较长,在平直流道之前加装一段收缩段可以加快流体的充分发展。为减小下游流体对激光孔径处冷却流场的影响,后置一段平直流道以提供压力恢复,称为出口段。图 3 为实验装置中单条冷却流道的结构示意图,其中激光孔径区流道的厚度为 0.5 mm,相应的流道三维尺寸为 0.5 mm×27 mm×38 mm,收缩段的入口厚度为 2 mm,长 25 mm,激光孔径前的平直流道长为 65 mm,后置平直流道长 13 mm。

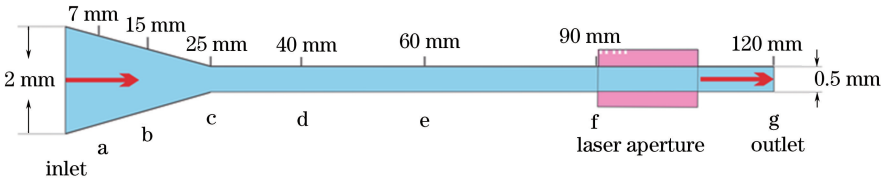


图 3 单条冷却流道的结构示意图

Fig. 3 Structure schematic of single cooling channel

入口流速的不均匀性会影响冷却流道内流体的运动状态,而管道流本身对来流速度不均匀性有一定的耗散效果。在多种流速不均匀性当中,沿流道截面长度方向(y轴)的流速不均匀较难耗散。图 4 为模拟的入口处的流速分布,入口平均流速为 2 m·s<sup>-1</sup>,基于流体力学中的层流模型计算了不同位置处流道截面内主流方向流速的分布情况,分别如图 4(a)~(h)所示。

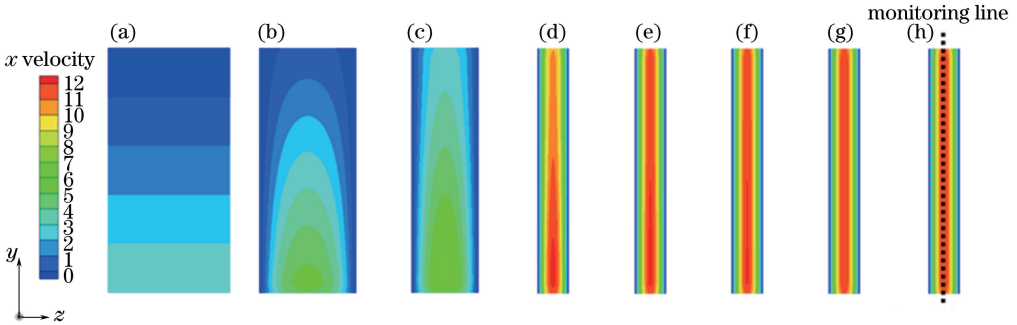


图 4 距入口不同距离处流道截面上的主流方向流速分布。(a) Inlet;(b)  $d=7$  mm;(c)  $d=15$  mm;(d)  $d=25$  mm;  
(e)  $d=40$  mm;(f)  $d=60$  mm;(g)  $d=90$  mm;(h)  $d=120$  mm

Fig. 4 Velocity profiles of the cross sections of the channel at different distances from the inlet. (a) Inlet; (b)  $d=7$  mm;  
(c)  $d=15$  mm; (d)  $d=25$  mm; (e)  $d=40$  mm; (f)  $d=60$  mm; (g)  $d=90$  mm; (h)  $d=120$  mm

因各位置流道厚度有所不同,定义流速分布的归一化标准差  $a$  来表征流速不均匀度,表示为

$$a = \frac{\sqrt{\sum_N (v - \bar{v})^2 / N}}{\bar{v}}, \quad (1)$$

式中  $v$  为各采样点的流速,  $\bar{v}$  为所有采样点的平均流速。计算了距入口的不同距离处、如图 4(h)所示的流道截面中心线处流速分布的归一化标准差变化曲线,如图 5 所示。

由图 4、5 可以看出,沿  $y$  轴方向流速截面的不均匀性随流体在管道内的流动逐渐降低,距流道入口的距离  $d > 70$  mm 之后,流道截面的流速分布基本不变。由此可以判断在到达激光孔径之前冷却流体已充分发展。

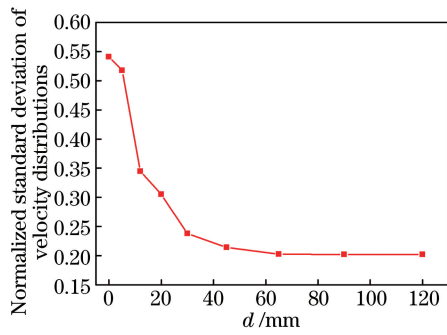


图 5 距入口不同距离处流道中心线流速分布的归一化标准差变化

Fig. 5 Normalized standard deviation of velocity distributions in the center line of cross sections of the channel at different distances from the inlet

### 2.3 层流流场冷却能力研究

作为直接液冷激光器的冷却结构,冷却流场的冷却能力直接决定了激光介质的最大热负载。对于传统的固体激光器,可使用热像仪直接采集得到固体介质表面的温度信息。直接液冷激光器的增益介质浸没在冷却液中,需要透过激光窗口和冷却液来观察介质温度,但通常作为冷却液的硅氧烷、去离子水以及作为窗口的石英玻璃均对热辐射所在的波段有强烈的吸收,难以直接观察增益介质温度。本课题组曾采用一种间接方法来测量流体的冷却能力,使用硅氧烷溶液在一侧冷却、另一侧被薄膜电阻加热的铜块,使用热像仪(SC655,FLIR 公司,中国)探测薄膜电阻表面温度来推算冷却流体的换热能力,其中薄膜电阻的电阻值为  $7.2 \Omega$ ,流道厚度为  $1 \text{ mm}$ ,来流温度和室温均保持在  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[14]</sup>。

在此根据原实验条件,建立了如图 6(a)所示的模型来间接测量流体的冷却能力,基于流体动力学中的层流模型,使用 Fluent 软件计算了装置的温度信息<sup>[16]</sup>。图 6(b)为流速为  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,工作电流为  $4 \text{ A}$ ,对应面生热密度为  $6.1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,通过热像仪直接采集得到的温度图像,提取选中区域内的温度信息,得到的温度分布如图 6(c)所示,同时给出了相同生热及冷却条件下通过数值计算得到的温度分布,可以看到两者的温度分布形态有一定的相似性。图 7 为薄膜电阻在不同生热密度下其表面平均温升随流场流速的变化,其中实线为实验值,虚线为模拟值。可以看到实验值与模拟值的变化趋势相似,数量相当,偏差值小于  $10\%$ ,很好地证明了数值模型的置信性。

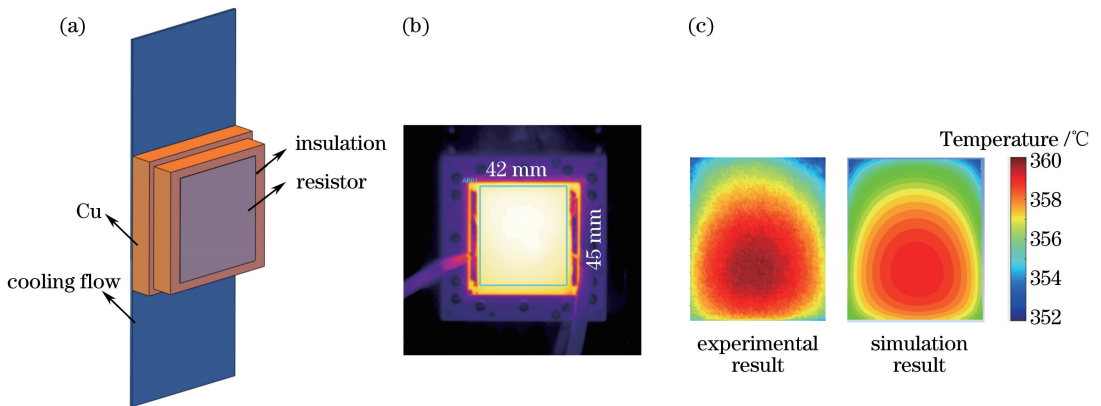


图 6 仿真模型及其与实验结果的比较。(a)仿真模型;(b)薄膜电阻表面温度分布;(c)实验与仿真结果对比

Fig. 6 Simulation model and the comparison with the experimental results. (a) Simulation model; (b) temperature distribution of the surface of the resistor; (c) comparison of the experimental and simulation results

以来流温度( $22 \text{ }^\circ\text{C}$ )为计算参考值,基于层流模型计算得到不同流道厚度  $d$  下对流换热系数随流速的变化曲线,如图 8 所示。可以看出对流换热系数随流速增加而增加,且在相同流速下,流道越窄,对流换热系数越大。在流速为  $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,厚度  $d=1.0 \text{ mm}$  流道的对流换热系数为  $3030$ ,而相同流速下厚度  $d=0.2 \text{ mm}$  流道的对流换热系数为  $5043$ , $d=1.0 \text{ mm}$  流道的对流换热系数仅为厚度  $d=0.2 \text{ mm}$  流道的  $60\%$ 。计算结

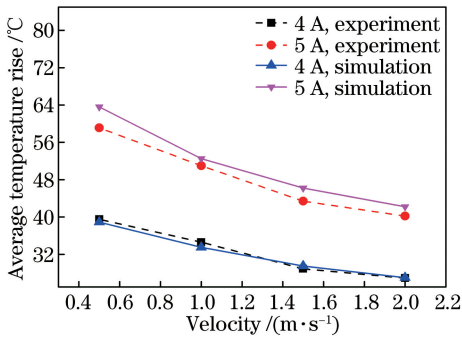


图 7 薄膜电阻表面的平均温升随流速变化

Fig. 7 Average temperature rise of the thin-film resistor' surface versus flow velocity

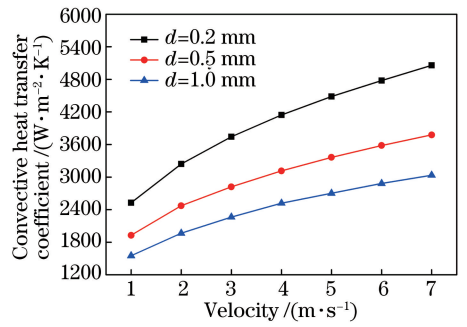


图 8 不同厚度管流对流换热系数随流速变化

Fig. 8 Convective heat transfer coefficient versus flow velocity at different channel thickness

果表明提高流速、减小流道厚度可以大幅提高管流的换热能力。

## 2.4 抽运及热计算

为了得到充足的抽运功率,在两侧各放置了两个偏振方向相同的半导体激光器(LD)叠阵,使用半波片将其中一个叠阵的偏振方向转 $90^\circ$ ,然后使用偏振合束镜将两叠阵发出的抽运光进行合束,如图1所示。其中每个叠阵包含300个Bar,以 $5 \times 60$ (宽 $\times$ 高)排布,每个Bar均经过了快轴准直。在最大峰值功率为200 W、占空比为12.5%时,单Bar的快轴发散角为 $4^\circ \sim 6^\circ$ ,慢轴发散角为 $7^\circ \sim 9^\circ$ 。抽运光光轴与薄片侧面成一定角度,使抽运光在薄片内部全反射传输。

使用Zemax软件对光学元件的位置和结构参数进行了优化。综合考虑未被吸收的抽运光的影响和抽运均匀性,吸收效率设计为95%,相应的薄片掺杂原子数分数为0.25%。图9(a)为模拟得到的GM侧面的抽运强度分布,相应的抽运效率为91.4%,抽运均匀性为59.8%。图9(b)为GM内部距离薄片侧面为5 mm平面的抽运强度分布,可以推断此设计实现了抽运光在薄片内部的全反射传输。激光口径上平行于薄片端面的归一化增益分布如图9(c)所示,抽运强度在薄片入口处强,在中心处弱。

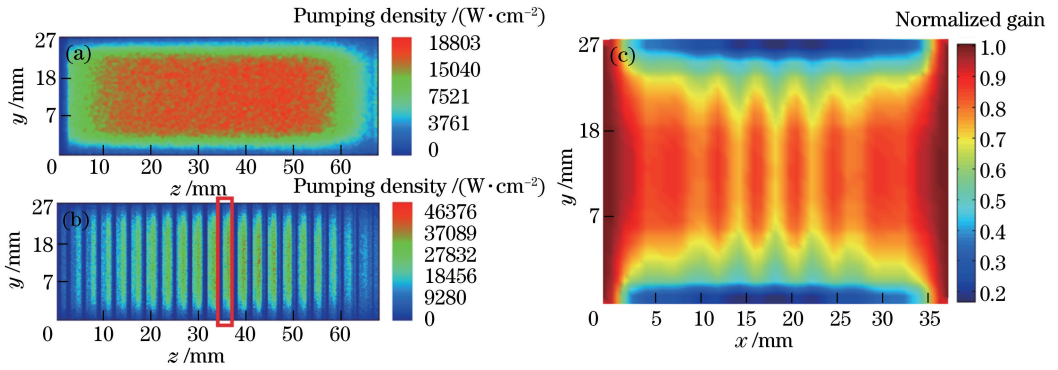


图 9 GM 的抽运强度分布(峰值)和归一化增益分布。(a) GM 侧面;(b) GM 内部距侧面 5 mm 处;  
(c)激光口径上平行于薄片端面的归一化增益分布

Fig. 9 Pumping density distribution (peak) and normalized gain distribution of the GM. (a) Side surface of the GM;  
(b) the plane 5 mm away from the side surface in the GM; (c) normalized gain distribution in the laser aperture in parallel with end surfaces of thin disks

直接液冷薄片激光器的安全运行不仅要求增益介质的应力小于断裂极限,而且要求液体最高温度小于冷却液的沸点。根据抽运计算结果,取中间一片薄片的三维抽运强度数据代入层流模型,使用Fluent软件计算薄片介质的温度分布。叠阵的占空比为2.5%,薄片吸收的抽运功率约为268 W,假设产热效率为38%<sup>[17]</sup>,相应的薄片产热功率约为102 W。使用流动的硅氧烷溶液在薄片端面进行冷却,其他面设置为绝热。在来流温度为 $22^\circ\text{C}$ ,流速为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,计算得到的薄片的温度分布如图10(a)所示,温度分布呈现两侧高中间低、沿冷却液流动方向入口低出口高的特征,最高温度出现在薄片侧面的钝角位置,为 $51^\circ\text{C}$ ,远低于

于冷却液的沸点。薄片的装夹采用了一种柔性装夹方式,根据薄片温度分布计算了其应力分布,如图 10(b)所示,最大应力位于薄片侧面的锐角位置,为 15 MPa,远低于 Nd:YAG 材料的典型应力断裂极限(130~260 MPa)。

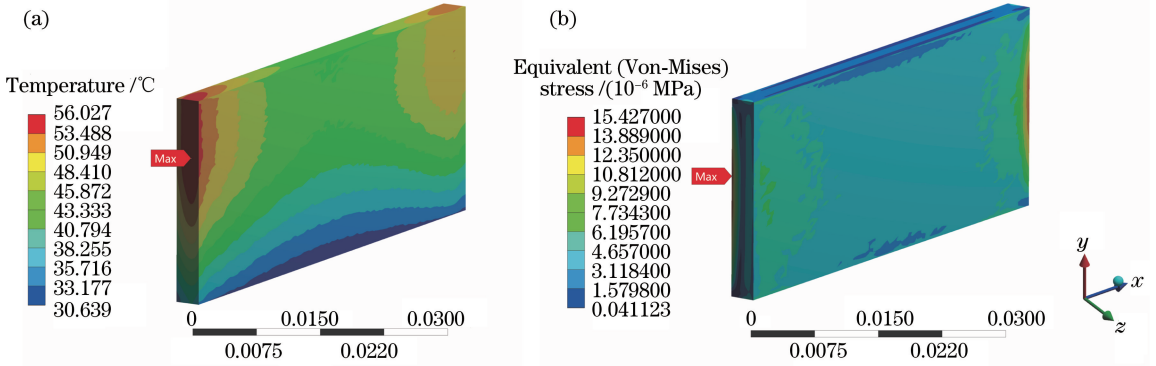


图 10 热计算结果。(a)温度分布;(b)应力分布

Fig. 10 Results of thermal calculation. (a) Temperature distribution; (b) stress distribution

### 3 实验结果及讨论

直接液冷侧面抽运 Nd:YAG 多片激光谐振腔的结构已在第2节详细描述。保持硅氧烷溶液在冷却流道中流动,流速为  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。使用单侧的两个 LD 叠阵抽运 GM,抽运脉冲宽度  $\tau = 250 \mu\text{s}$ ,重复频率  $f = 25 \text{ Hz}$ ,当 LD 在最大电流下工作时,使用功率计测得模块前和模块后抽运光功率分别为 639.5 W 和 16 W,相应最高单脉冲能量为 24.94 J,吸收效率为 97.5%。

使用 4 个 LD 叠阵抽运 GM,在未提取状态下使用近红外光电探测器观察 GM 自激光窗口和抽运窗口出射的荧光,未发现明显的寄生振荡光斑。加入谐振腔镜,使激光在平凹腔内振荡,其中 HR 的曲率  $R = 2 \text{ m}$ ,OC 耦合输出率为  $T = 55\%$ 。在抽运脉冲能量为 30 J 时,使用红外摄像机(SPU620,OPHIR 公司,以色列)测量激光光斑,如图 11 所示。可以看出激光强度分布与图 9(c)中的抽运强度分布相似。

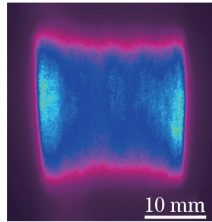


图 11 输出激光光斑

Fig. 11 Profile of the output laser beam

为了得到最佳耦合输出率,在抽运脉冲能量为 49.9 J,重复频率为 25 Hz 时,采用 5 块具有不同透过率的 OC 进行实验,分别测量其对应的脉冲输出能量,实验结果如图 12(a)所示,OC 的最佳透过率在 55%左右。图 12(a)的插图为 OC 透过率为 55%时,输出激光脉冲能量随抽运脉冲能量的变化曲线。可以看到当抽运脉冲能量约为 18 J 时,激光谐振腔达到激光阈值,当抽运脉冲能量为 49.9 J 时,得到最高 15.7 J 的脉冲能量,相应的光-光效率为 31.4%,斜率效率为 39.2%。

平均输出功率和光-光效率随抽运重复频率的变化如图 12(b)所示。可以看到光-光效率随重复频率的增加逐渐降低,推断其由 GM 的热效应引起。在平均抽运功率为 5 kW(重复频率  $f = 100 \text{ Hz}$ )时,获得 1440 W 的平均输出功率,光-光效率为 28.7%。

当最高脉冲能量为 15.7 J 时,测得的激光脉冲波形如图 13 所示,可以看到在前  $65 \mu\text{s}$  内没有激光输出,为上能级粒子数的累积过程,抽运  $65 \mu\text{s}$  后开始弛豫振荡过程,随着时间推移逐渐稳定输出。

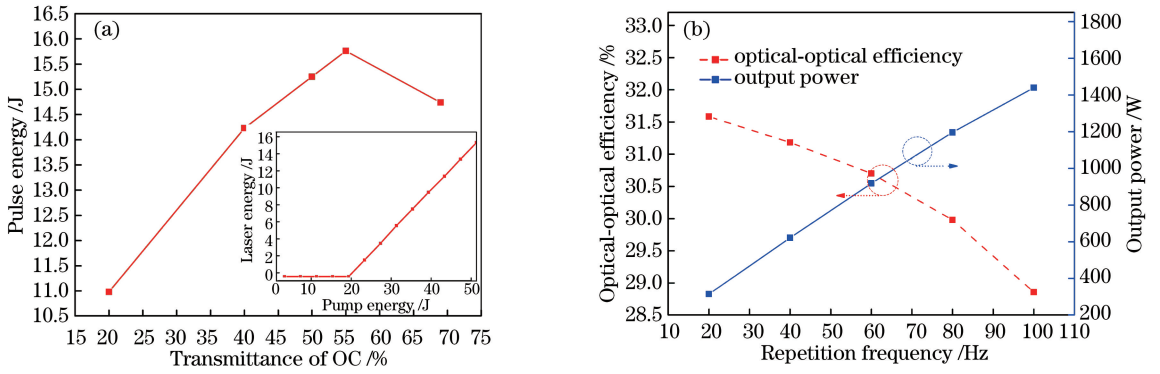


图 12 激光谐振腔输出特性。(a)脉冲能量随 OC 透过率的变化;(b)输出特性随抽运重复频率的变化  
Fig. 12 Output characteristic of the laser resonator. (a) Pulse energy versus the transmittance of OC;  
(b) output characteristic versus pump repetition frequency

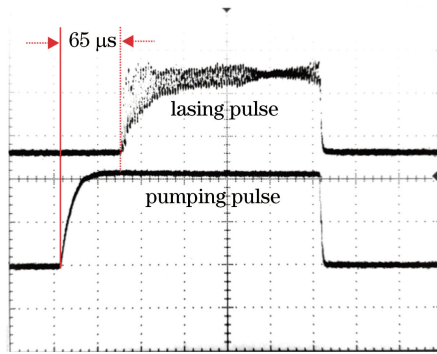


图 13 输出激光脉冲波形  
Fig. 13 Waveforms of output laser pulse

## 4 结 论

设计了浸入式直接液冷多薄片激光器的层流冷却流场,基于流体力学层流模型验证了其对来流不均匀性的耗散能力。根据本课题组之前报道的层流冷却能力测量实验建立了数值模型,模拟了相同生热及冷却条件下的冷却效果,并与实验结果进行了比较,实验结果证明了使用流体力学层流模型解决浸入式固体激光器层流流场传热问题的置信性。

研制了一种使用硅氧烷聚合物溶液作为冷却液的直接液冷双侧抽运 Nd:YAG 多片介质激光谐振腔,抽运光在薄片增益介质内部全反射传输的同时被吸收,振荡激光以布儒斯特角透射式穿过多片薄片和冷却液,GM 的结构相当紧凑,仅为 150 mm×96 mm×88 mm。装置使用充分发展的层流流场冷却薄片激光增益介质,在冷却液流速为 5 m·s<sup>-1</sup> 情况下,当抽运脉冲能量为 49.9 J 时,得到 15.7 J 的最高脉冲能量输出,相应的光-光效率和斜率效率分别为 31.4% 和 39.2%。在重复频率为 100 Hz 时,获得最高平均功率 1440 W 的激光输出,相应的光-光效率为 28.7%。随激光介质口径及数目的增加,输出功率可以进一步提升,所提谐振腔具有优异的功率扩展能力。然而,目前仍有许多问题需要解决,包括更高功率下的冷却流场设计、波前畸变的抑制及校正等,这将是今后工作的重点。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
  - [2] An Xiangchao, Tang Chun, Shang Jianli, et al. 10 J diode-pumped thin-disk laser in unstable resonator[J]. Chinese J 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.



- [3] Wang K, Tu B, Jia C Y, *et al.* 7 kW direct-liquid-cooled side-pumped Nd:YAG multi-disk laser resonator[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 15012-15020.
- [4] Cai Zhen, Wang Xiaojun, Jiang Jianfeng, *et al.* Study of uniform pumping and uniform cooling on thin disk laser[J]. *Chinese J 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.
- [5] Nie R Z, She J B, Zhao P F, *et al.* Fully immersed liquid cooling thin-disk oscillator[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(11): 115808.
- [6] Pan Sunqiang, Zhao Zhigang, Liu Chong, *et al.* Mechanism investigation of beam quality evolution within laser oscillator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 111406.  
潘孙强, 赵智刚, 刘 崇, 等. 激光振荡器内光束质量演变的机理研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 111406.
- [7] Li Mi, Hu Hao, Tang Chun, *et al.* Edge distortion suppressing in Nd:YAG slab laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1214003.  
李 密, 胡 浩, 唐 淳, 等. Nd:YAG 板条激光器边缘畸变抑制[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1214003.
- [8] Sazegari V, Milani M R J, Jafari A K. Structural and optical behavior due to thermal effects in end-pumped Yb:YAG disk lasers[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(36): 6910-6916.
- [9] Mandl A, Klimek D E. Textron's J-HPSSL 100 kW ThinZag® laser program[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2010: 11428712 .
- [10] Perry M D, Banks P S, Zweiback J, *et al.* Laser containing a distributed gain medium: US, US7366211[P]. 2017-02-16.
- [11] General Atomics. Gen 3 High Energy Laser Completes Beam Quality Evaluation[OL]. <http://www.ga-asi.com/gen-3-high-energy-laser-completes-beam-quality-evaluation>, 2015.
- [12] Fu X, Li P L, Liu Q, *et al.* 3 kW liquid-cooled elastically-supported Nd:YAG multi-slab CW laser resonator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18421-18432.
- [13] Fu X, Liu Q, Li P L, *et al.* Numerical simulation of 30-kW class liquid-cooled Nd:YAG multi-slab resonator[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18458-18470.
- [14] Ye Z B, Liu C, Tu B, *et al.* Kilowatt-level direct-refractive index matching liquid'-cooled Nd:YLF thin disk laser resonator[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1758-1772.
- [15] Koechner W. *Solid-state laser engineering*[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 93.  
W 克希耐尔. *固体激光工程*[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 93.
- [16] Patankar S V. *Numerical heat transfer and fluid flow*[M]. San Diego: Hemisphere Publishing Corporation, 1980: 112-190.
- [17] Su H, Wei Y X, Wang X J, *et al.* Modal instability in high power solid-state lasers with an unstable cavity[J]. *Optics Communications*, 2015, 341: 37-46.