

引用格式: LIU Rui, GONG Fa-quan, LI Xiang, *et al.*, Research on Heat Transfer Characteristics of Porous Foam Heat Sink for All Solid State Thin Disk Lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4):0414002

刘锐, 公发全, 李想, 等. 全固态碟片激光器的多孔泡沫热沉传热特性研究[J]. 光子学报, 2020, 49(4):0414002

全固态碟片激光器的多孔泡沫热沉传热特性研究

刘锐¹, 公发全², 李想², 戴隆辉², 李刚², 谭勇¹

(1 长春理工大学 理学院, 长春 130022)

(2 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要: 高功率全固态碟片激光器在运行中产生的热透镜效应会引起激光器输出功率降低、光束质量退变, 针对该问题本文将多孔碳化硅泡沫和毫米通道引入到全固态碟片激光器的换热热沉中, 并将其应用于多冲程泵浦的全固态碟片激光器. 利用有限元分析软件对其结构模型参数进行了优化, 当碳化硅厚度为 2 mm, 孔隙率为 40%, 入水口压力为 4 kg (0.4 MPa) 时, 系统理论换热系数为 $1.51 \times 10^5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, 实验测量结果为 $1.45 \times 10^5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, 理论和实验结果较为接近, 验证了理论模型的正确性. 最后利用该新型热沉搭建了基于 Yb: YAG 的 24 冲程全固态碟片激光器实验装置, 获得输出功率为 393 W, 波长为 1 030 nm 的连续激光输出, 光-光转换效率达到 52%, 光束参数乘积为 5.918 mm · mrad.

关键词: 固体激光器; 全固态碟片激光器; 多孔泡沫毫米通道热沉; 多孔介质; 换热系数

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204904.0414002

Research on Heat Transfer Characteristics of Porous Foam Heat Sink for All Solid State Thin Disk Lasers

LIU Rui¹, GONG Fa-quan², LI Xiang², DAI Long-hui², LI Gang², TAN Yong¹

(1 School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Key Laboratory of Chemical lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: The thermal lens effect of high-power all solid state thin disk lasers in operation can cause the laser output power to decrease and the beam quality to deteriorate. In this paper, focus on this problem, porous SiC foam and millimeter channels are introduced into the heat transfer heat sink of the thin disk laser and applied to all solid state thin disk laser. The finite element analysis software is used to optimize the structural model. And the simulation analysis indicates that, when the thickness of SiC is 2 mm, the porosity is 40% and the inlet pressure is 4 kg (0.4 MPa), the theoretical heat transfer coefficient is $1.51 \times 10^5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, the experimental heat transfer coefficient is $1.45 \times 10^5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, the results are similar to each other, which verifies the correctness of the theoretical model. Finally, the new heat sink is used to build a 24 multi-passes all solid state thin disk lasers experimental device based on Yb: YAG. The continuous laser output with output power of 393 W and wavelength of 1 030 nm is obtained, the optical-optical efficiency is 52% and the beam product parameter is 5.918 mm · mrad.

Key words: Solid state laser; All solid state thin disk lasers; Porous foam millimeter channel heat sink; Porous medium; Heat transfer coefficient

基金项目: 大连市科技创新基金 (No.2018J11CY013)

第一作者: 刘锐 (1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光及其与物质相互作用. Email: 1978999199@qq.com

导师 (通讯作者): 谭勇 (1975—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光及其与物质相互作用. Email: laser95111@126.com

收稿日期: 2019-11-27; 录用日期: 2020-01-21

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

限制高功率全固态激光器功率提升的一个重要因素是增益介质的废热管理问题.为解决高功率全固态激光器的散热问题,从棒状激光器演化成具有高长径比(100 : 1)的光纤激光器和高径厚比(100 : 1)的碟片激光器^[1]成为二极管泵浦全固态激光器的研究热点.其中,全固态碟片激光器在 1 030 nm 波长范围内实现了光-光效率大于 50%,单碟片万瓦级连续输出,但其实际输出功率距离理论输出功率仍相差甚远,仅为理论值的 1%^[2-3].同时,全固态碟片激光器也是目前报道的掺钕(24 W)和钬(50 W)连续激光输出中光-光转换效率(41%和 58%)最高的中远红外激光器^[4].限制其功率提升的重要因素是全固态激光器的废热管理问题^[5-6].全固态激光器的废热主要有三个来源:量子亏损、自发辐射跃迁与散射损耗(腔内衍射损耗、膜层反射损耗等),其中,最主要的废热来源为量子亏损产热.虽然全固态碟片激光器具有良好的散热结构,但在高功率泵浦时,仍然存在严重的热透镜效应^[7-9].

由于全固态碟片激光器采用匀化棒匀化泵浦光,其在增益晶体上可获得较为均匀的泵浦区域,保证受热负载面更加均匀^[10-13].如何能对其进行均匀散热,保证晶体表面的极小热梯度,提升激光器的光束质量,是如今二极管泵浦全固态碟片激光器的一个重要研究方向.目前应用于全固态碟片激光器散热的主要有射流冷却和微通道冷却系统^[14-16].射流冷却结构简单、易于加工,缺点是容易在出水口附近形成驻点,导致中心散热能力优于边缘,造成严重的热温度梯度.微通道冷却由于结构特殊,散热相较于射流冷却更加均匀,但其结构加工复杂,且微米通道容易阻塞.有效热管理一直是各种结构的高功率全固态激光器的核心研究问题,国内外学者做了大量的研究工作,工作主要集中于对射流孔布局、数目增减和毫米通道形状、排列间隔的优化^[17-24].

为进一步提升热沉的换热效果,本文提出将多孔泡沫介质和毫米通道热沉应用于全固态激光器的热沉中.由于多孔介质具有特殊物理特性,其内部存在相互贯通的小孔,通过调控小孔间孔隙率能够使热沉的散热均匀性获得进一步提升,在毫米通道易于加工的同时,可最大限度减小驻点的产生.利用有限元分析软件对其结构进行优化,以获得最佳结构参数.最后,自主设计了基于多孔泡沫介质的热沉并将其应用于多冲程碟片激光器之中,获得了 393 W 的连续激光输出,光-光效率 52%,验证了该热沉结构在高功率全固态碟片激光器应用中的可靠性,为高功率全固态碟片激光器在功率放大器中的研究提供了参考.

1 数值模型分析与讨论

1.1 物理模型

图 1 为多孔结构热沉换热模型,其中,金刚石与泡沫采用金属钢焊接,钢层厚度约为 10 μm ,下层焊接于毫米通道上.为防止回流焊料堵塞通道口,将微通道口下沉 0.1 mm,这样有利于焊接焊料的顺利流出.当毫米通道热沉填充多孔介质层后,其流动冷却介质压降明显增加,这是由于多孔介质内部错综复杂的微结构所致的.当冷却水从多孔介质内流过时,固体内骨架之间流动的液体相互混合,使得流体的非线性效应增强,压降增大,随着水流流速的提升,介质内的压降将会进一步提高.

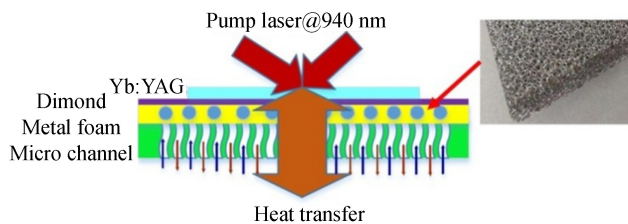


图 1 多孔结构热沉换热模型

Fig.1 Heat transfer model of porous structure heat sink

多孔介质模型采用经验公式来定义多孔介质上的流动阻力.即增加一个代表动量消耗的源项,粘性损失项与惯性损失项之和可表示为

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho v_{\text{mag}} v_j \right) \quad (1)$$

式中, S_i 为动量方程中附加的源项, D 与 C 为矩阵项, μ 为粘性系数, v 为速度矢量, 对于简单均匀的多孔介质, 式(1)可简化为

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v_i + C_2 \frac{1}{2}\rho v_{\text{mag}}v_i\right) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{d_p^2 \cdot \gamma^3}{150 \times (1-\gamma)^2} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{3.5 \cdot (1-\gamma)}{d_p \cdot \gamma^3} \quad (4)$$

式中, α 为渗透率, 可由式(3)计算得到; C_2 代表惯性阻力系数, 可由式(4)计算得到. 式(3)、(4)中, d_p 为多孔介质平均孔径; γ 为孔隙率.

多孔介质对能量方程的影响体现在对对流项和时间导数的修正上. 在多孔介质对对流项的计算中采用了有效对流函数, 在时间导数项中则计入了固体区域对多孔介质的热惯性效应, 其表达式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma \cdot \rho_f E_f + (1-\gamma)\rho_s E_s) + \nabla \cdot [\bar{v}(\rho_f E_f + p)] = \nabla \cdot [k_{\text{eff}}\nabla T - (\sum_i h_i J_i) + (\bar{\tau} \cdot \bar{v})] + S_f^h \quad (5)$$

式中, E_f 为流体总能; E_s 为固体介质总能; S_f^h 为流体焓的源项; k_{eff} 为介质有效导热率, 可表示为

$$k_{\text{eff}} = \gamma k_f + (1-\gamma)k_s \quad (6)$$

式中, k_f 为流体的热导率, k_s 为固体的热导率. 为了简化计算方程, 假设可忽略多孔介质与固体外壁的接触热阻, 并且假设多孔介质各向同性. 通过改变多孔介质的孔隙率、多孔介质厚度对填充多孔介质后的毫米通道换热结构进行模拟分析, 最终确定热沉结构.

孔隙率是指多孔介质内部孔隙的总体积占多孔介质总体积的比值, 其表达式为

$$\Phi = V_p/V_b \quad (7)$$

式中, V_p 代表多孔介质内孔隙的总体积, V_b 代表多孔介质的总体积, 实验采用碳化硅多孔介质. 本文定义孔隙率为一个连续的函数, 认为孔隙率与空间位置无关, 沿各个方向传输过程中的粘度阻力系数相同, 对该多孔介质而言是均质的, 均质的多孔介质的孔隙率为常数. 其中, 多孔介质材料可采用泡沫材料为碳化硅、钛、铜、铁、铝等, 毫米通道尺寸在 2~3 mm, 可有效降低高昂的微通道加工成本, 并可减少由于间隙过小造成的水道阻塞现象. 表 1 为模型计算所需基本参数.

表 1 模型基本参数

Table 1 Basic parameters of the model

| Description | Numerical value |
|--------------------------------------------|-----------------|
| Skeleton material | Silicon carbide |
| Average aperture/mm | 0.5 |
| Indium tin solder thickness/ μm | 10 |
| Cooling water temperature | 20 |
| Ambient temperature | 22 |
| Thickness of porous media/mm | 1~4 |
| Average aperture/mm | 0.5 |
| Porosity/% | 10, 40, 65, 95 |
| Turbulence/% | 5 |
| Inlet flow/kg | 1~5 |
| Pump spot diameter/mm | 4.5 |

1.2 多孔泡沫热沉对孔隙率的选择

多孔介质的孔隙率能够通过工艺控制实现不同的需求, 为此利用有限元分析出不同孔隙率下, 热沉表面温度随孔隙率的变化曲线. 如图 2(a) 所示, 随着孔隙率的提升, 热沉的换热系数呈现先增大后减小的变化规律, 其中在孔隙率为 43% 点附近出现温度最低点. 同时, 由图 2(b) 给出孔隙率分别为 95%、65%、40%、10% 时热沉的换热系数分布曲线, 可以看出换热系数曲线呈现“峰谷”变化, 这主要是由于毫米通道采用进出交替变化出入水设计导致的.

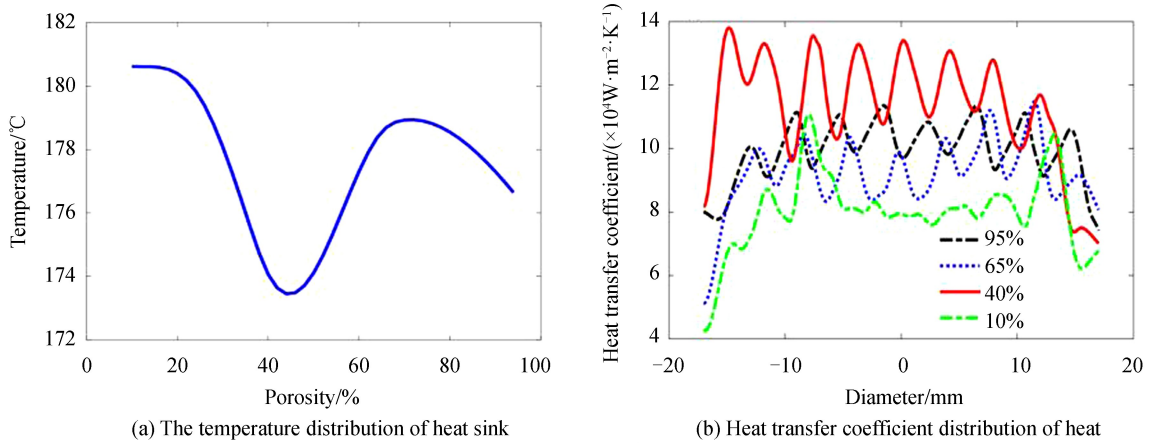


图2 热沉温度及换热系数分布

Fig.2 Heat sink temperature and heat transfer coefficient distribution

从热沉温度及换热系数分布上可以看出,随着孔隙率的增加,换热系数先增大后减小,其中在孔隙率为40%附近呈现出最大值。

1.3 多孔泡沫热沉对多孔介质厚度的选择

由于多孔介质可增加流体的热阻,其厚度参数尤为重要,因此在多孔介质厚度为1~4 mm时,对热沉模块分别进行有限元仿真分析,通过确定热沉表面温度间接衡量热沉换热能力。图3为热沉表面随温度介质厚度变化的曲线,可见,多孔介质厚度约在1.5~2 mm之间时,晶体温度最低。因此选择拐点位置2 mm厚的多孔介质为设计参数。

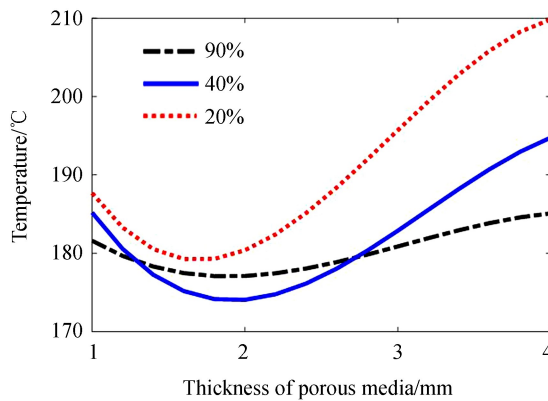


图3 热沉表面温度随多孔介质厚度的变化

Fig.3 The variation of maximum temperature of heat sink with the thickness of porous media

1.4 多孔泡沫热沉对入水口压力的选择

由于入水口压力是影响热沉换热效果的关键因素,因此对该热沉装置的入水口水压进行分析。如图4所示,当逐渐加大入口压力的提升,热沉表面的温度急剧下降,当水压升至3~4 kg(0.3~0.4 MPa)后,热沉表面温度开始呈缓慢趋势下降,随着外部水压的进一步增加热沉的换热系数进一步提升,但是由于高压水会使冷却系统的结构设计更加复杂,通常选择入水口压力为4 kg(0.4 MPa)对热沉换热较为合理。

综合上述参数,在模型参数相同的情况下,选择40%孔隙率,2 mm厚多孔介质,分别仿真了含多孔介质与不含多孔介质的晶体模块的流速情况。冷却系统流速的对比如图5,可以看出添加多孔介质材料后,流速变得更加均匀,在不改变毫米通道散热能力的同时,进一步提升了热沉换热的均匀性,对提升均匀泵浦的全固态激光器的散热效果具有尤为重要的意义。

物理模型流速对比为相同参数条件下,孔隙率为40%时,有无多孔介质时热沉内流速情况如图5,可以看出添加了多孔介质后热沉内流速更加均匀。

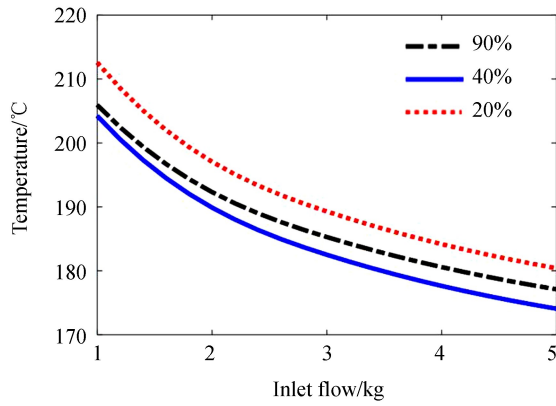


图 4 热沉温度随入水口压力的变化
Fig.4 Variation of heat sink temperature with inlet pressure

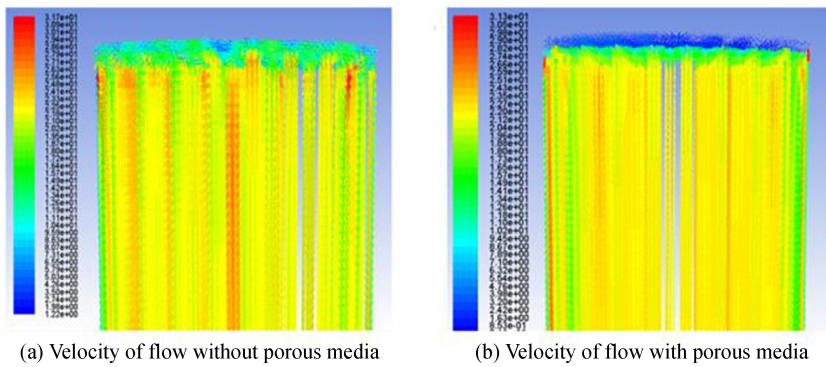


图 5 物理模型流速对比
Fig.5 Comparison of velocity of physical model

为进一步说明孔隙率对热沉变化温度的变化规律,如图 6 所示,给出多孔泡沫在孔隙率为 95%、65%、40%、10%时的热沉换热系数分布,可以看出当孔隙率为 40% 左右时,晶体的换热系数 h 获得最大值,达到

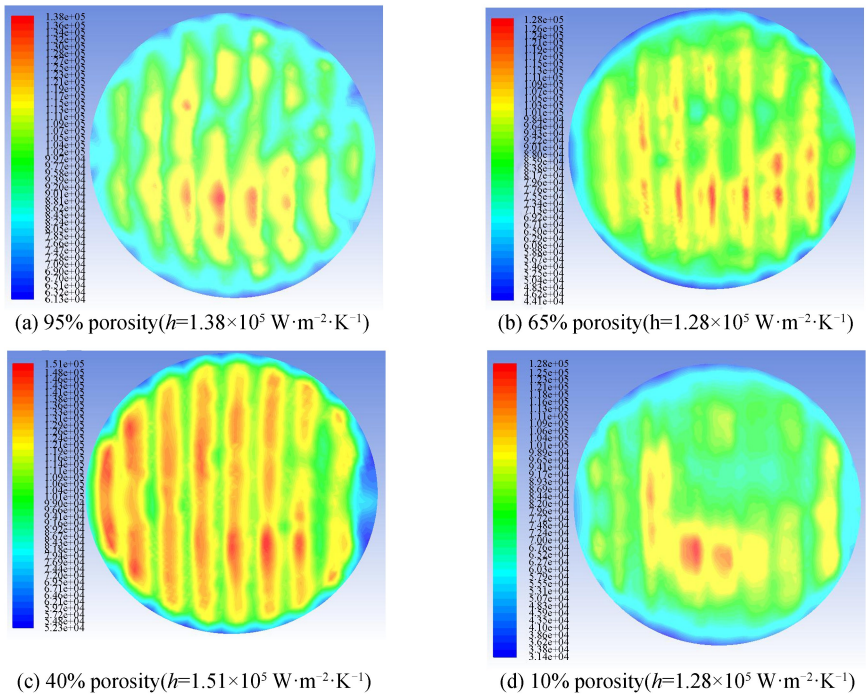


图 6 不同孔隙率的换热系数
Fig.6 Heat transfer coefficients with different porosity

$1.51 \times 10^5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, 从热沉变化温度分布可看出其表面温度分布较为均匀。

2 实验验证

为进一步证明多孔介质的换热能力, 对该热沉换热系数测量系统进行了搭建, 图 7 所示为多孔泡沫热沉换热系数测量系统和热沉实物图 (ZL 201510860793.9), 利用牛顿对流换热方程

$$\frac{Q}{t} = W = S \cdot h \cdot \Delta t \quad (8)$$

式中, S 为接触热负荷的接触面积, h 为系统的换热系数, Δt 为相对温度变化, W 为作用于热沉表面上的总功率。实验采用 180 W、940 nm 泵浦源作为系统热源, 由于纯金刚石具有透过性, 需要在其表面镀金属铬膜, 防止入射激光直接进入热沉内部, 膜层厚度约为 100 nm 左右, 该铬膜作用仅提供热源积累, 当激光热负载加载后, 不考虑散射光和膜层吸收, 剩余反射光可利用功率计接收探测。剩余的功率作为该热沉的热负载, 影响换热效果的主要因素仍然是热沉结构。通过 SMA905 接口连接聚焦镜 ($F=40 \text{ mm}$), 输出的激光聚焦于金刚石表面, 入射角度为 45° 、光斑大小为 4.5 mm, 图 7 为多孔热沉换热系数测量系统及多孔热沉装置示意图。

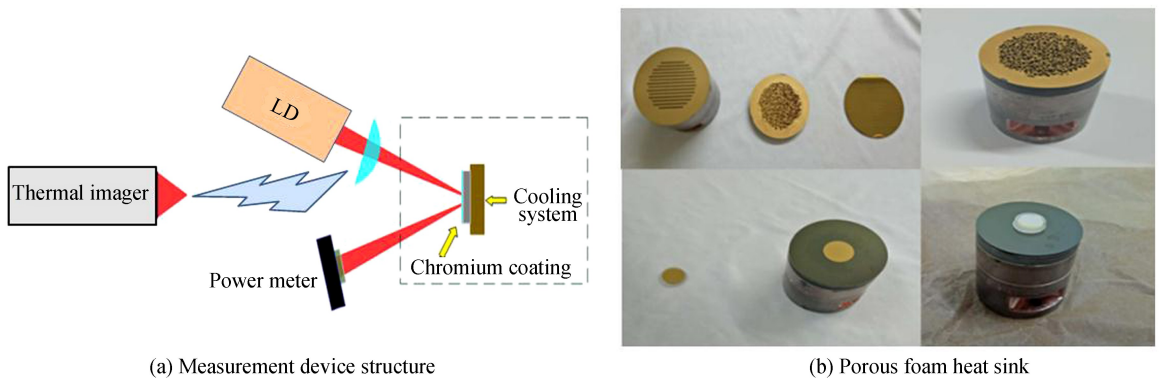


图 7 多孔泡沫热沉换热系数测量系统

Fig.7 Measurement system of heat transfer coefficient of porous foam heat sink

当输出功率为 180 W 时, 检测到剩余功率为 88 W, 根据能量守恒定律可知, 有 92 W 功率以热量的形式损耗掉, 即作用于热沉表面的总功率为 92 W。采用热像仪多次测量其表面温升, 相对温度变化平均值 Δt 约为 39.9°C , 辐射面积 S 为 $15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。利用牛顿换热方程计算出热沉的平均换热系数 h 约为 $1.45 \times 10^5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, 由于所用多孔泡沫为工厂提供的 40% 孔隙率材料均匀性存在偏差, 因此模拟结果可能存在一定的误差。但在与图 6(c) 模拟仿真结果进行比较后, 误差仍在允许范围, 其换热系数与仿真结果基本保持一致, 证明了该数学模型的正确性。

为进一步验证该热沉的换热效果, 通过焊接工艺将厚度为 $200 \mu\text{m}$ 的 Yb:YAG 晶体焊接于其上, 工艺温度为 180°C , 焊接材料为金属钢, 熔点约为 156°C , 润湿层金膜层厚度为 200 nm , 钢层厚度为 $10 \mu\text{m}$ 。

为对比热沉换热效果, 采用 200 W 激光热负载系统进行测试, 泵浦光斑尺寸为 4 mm, 在焊接工艺参数工艺相同的情况下, 测量带多孔介质的热沉和普通毫米通道热沉上晶体的温度变化, 测量结果如图 8。

由图 8 可知, 在低功率泵浦下, 晶体上温度较为接近, 这是由于晶体在低功率泵浦下, 晶体内的废热可以通过热沉及时排出, 晶体上泵浦区域的温度接近。随着功率的提升, 晶体上的温度在 100 W 热负载作用下出现拐点, 添加多孔介质后的热沉表面的晶

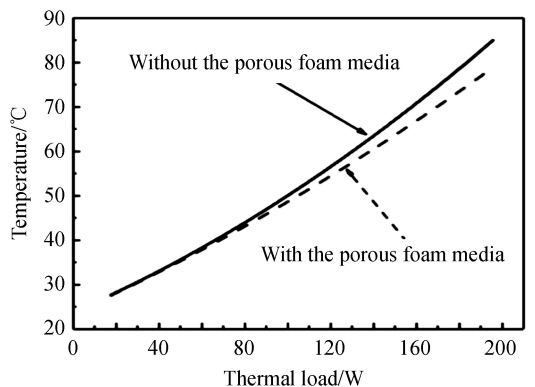


图 8 不同热负载下晶体上的温度分布

Fig.8 Temperature distribution of the disks with different thermal load

体温度明显低于未添加多孔介质材料的热沉.初步判断添加多孔介质后的热沉换热能力获得增加.为进一步证明该热沉的出光效果,测试其在大功率泵浦下的出光性能.

采用 750 W、969 nm 泵浦源进行出光实验,采用自主研制的 24 冲程碟片器系统,该装置可使约 95% 以上的泵浦光被晶体吸收.为验证热沉的换热效果,采用腔长 $L=200$ mm、曲率半径 $R=2000$ mm,耦合镜的耦合率为 2.5% 的直线腔进行连续出光实验,图 9 为实验装置及输出特性曲线.由图可知,随着泵浦光功率的进一步提升,出光效率不断提升,当输入功率在 500~550 W 时,输出功率趋于平稳;当泵浦功率上升到 750 W 后,输出功率出现下降的趋势.原因在于输出功率为 500 W 时,晶体上的泵浦功率密度接近 3000 W/cm².在室温下,为了维持激光稳定输出,在不考虑损耗的情况下,单位体积的阈值泵浦功率为^[25]

$$I = n_{\text{tran}} N_{\text{ion}} h\nu_p / \tau \quad (9)$$

为了克服光学损耗,通常需要维持激光在 5~8 倍阈值范围内,才可以实现稳定出光.室温下, Yb³⁺ 离子的下能级粒子数约 4.6%, n_{tran} 为激光材料对激光波长透明所需的泵浦粒子数在总粒子数中的分数. N_{ion} 为单位体积内的总粒子数,单位 cm⁻³. $h\nu_p$ 为泵浦光单光子能量,为上能级寿命 τ 为 0.95 ms.室温下的 $n_{\text{tran}} = 6.2\%$, $h\nu_p = 2.11 \times 10^{-19}$ J. Yb³⁺ 掺杂浓度为 10%,其单位体积内的粒子数为 13.31×10^{20} cm⁻³,晶体厚度为 200 μ m,可知单位体积内阈值功率密度为 18.31 kW/cm³,计算可知维持激光器稳定运行的最低功率密度为 3 kW/cm².若晶体上功率密度过高,热透镜效应将会造成腔型的变化,进而影响出光效率、光束质量和腔型的稳定性,通常晶体的功率密度不高于 5 kW/cm².

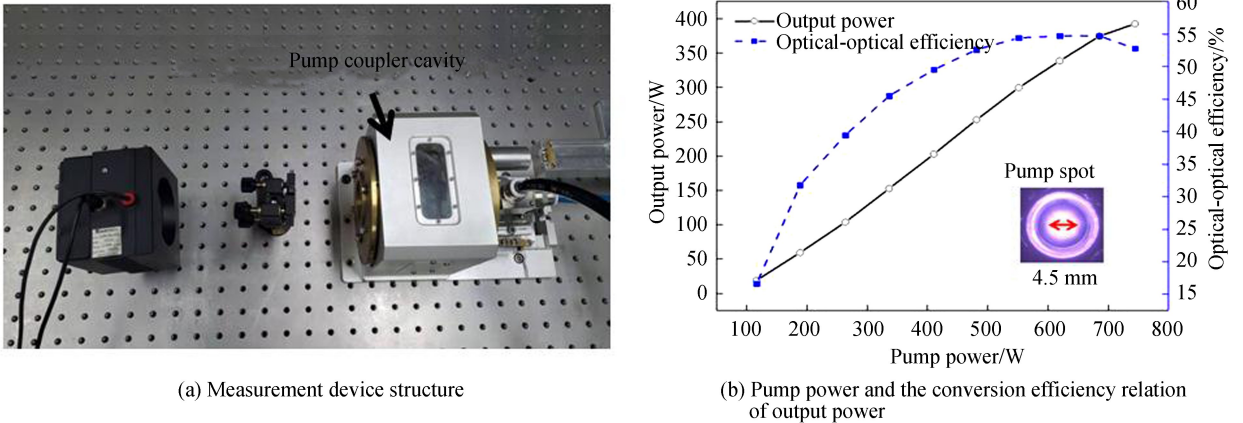


图 9 实验装置及其输出特性曲线

Fig.9 Experimental device and output characteristic curve

通常用光束束腰半径和远场发散角的乘积来描述激光器的光束质量,全固态碟片激光器的经验公式为

$$M^2 = \left(K \frac{\omega_{\text{pump}}}{\omega_{\text{disk}}} \right)^2 \quad (10)$$

高阶横模光束质量为

$$\text{BPP} = \omega_m \theta_m = M^2 \frac{\lambda}{\pi} \quad (11)$$

式中, ω_{pump} 为泵浦光斑的直径, ω_{disk} 为基横模在碟片晶体上的半径, K 代表光斑叠加因子,若 $K=1$ 为泵浦光斑完全叠加因子, $K=0.85$ 为碟片激光器叠加因子,通过式(10)、(11)可以初步估算激光器的光束质量.腔内光斑分布如图 10,计算得晶体上基横模光斑半径为 0.4435 mm,光束参数乘积(Beam Product Parameter, BPP)为 5.918 mm mrad.

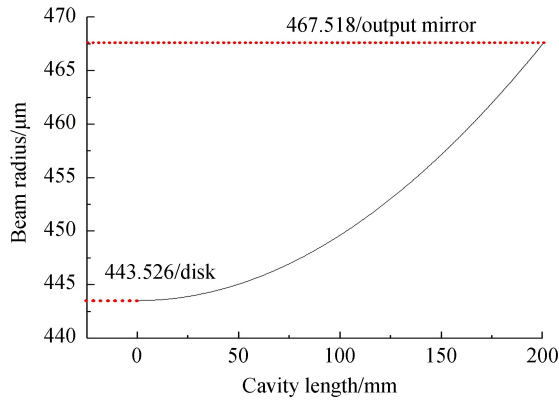


图 10 谐振腔内激光光斑分布

Fig.10 Beam radius distribution in resonator

3 结论

提出一种应用于高功率全固态碟片激光器的多孔介质毫米通道新型换热结构,基于 Brinkman-Forchheimer 模型对其参数进行了数值分析,并对多孔介质的孔隙率、厚度和水压进行了有限元分析,获得了最佳的设计参数.通过对热沉的模型分析可知,多孔介质的孔隙率是影响其换热系数的重要参数,孔隙率越小,热沉冷却效果越好,但同时流动阻力也越大.优化结果表明,当孔隙率为 40%,多孔介质厚度为 2 mm,入水口水压为 4 kg(0.4 MPa)时,热沉具有最佳的换热能力,利用以上设计参数研制了该热沉装置.

利用实验测量了添加多孔介质和不添加多孔介质时,热沉上晶体的温度变化,结果表明低功率下晶体的温度较为接近,当功率升高后,含多孔介质的热沉上的晶体温度明显降低,验证了添加多孔介质后对晶体的散热具有一定的改善.为进一步验证热沉的换热性能,搭建了基于多孔介质的毫米通道热沉的全固态碟片激光实验装置,实验获得了 393 W 的连续多模激光输出,光-光转换效率达到 52%,BPP 优于 $6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$.理论和实验证明,将多孔介质材料填充于毫米通道热沉内可使其内部流速更加均匀,该结构既解决了射流冷却系统容易形成“驻点”的问题,又解决了微米通道热沉加工制造困难的问题;初步证明了该热沉具有一定的可放大性和实用性,为接下来实现全固态碟片激光器的千瓦级定标放大奠定了理论和实验基础.

参考文献

- [1] GIESEN A, HÜGEL H, VOSS A, *et al.* Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. *Applied Physics B*, 1994, **58**(5): 365-372.
- [2] SPEISER J. Scaling of thin-disk lasers—influence of amplified spontaneous emission [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, **26** 26-35.
- [3] KOUZNETSOV D, BISSON J F, DONG J, *et al.* Surface loss limit of the power scaling of a thin-disk laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006, **23**(6): 1074-1082.
- [4] ZHANG J, SCHULZE F, MAK K F, *et al.* High-power, high-efficiency Tm: YAG and Ho: YAG thin-disk lasers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, **12**(3): 1700273.
- [5] LU Jun, LIU Zheng-zheng, LIU Yan-qi, *et al.* Femtosecond thin-disk regenerative amplifier under burst operation mode [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(5): 52-59.
陆俊, 刘征征, 刘彦祺, 等. 突发运行模式下的飞秒碟片再生放大器[J]. *中国激光*, 2017, **44**(5): 52-59.
- [6] YU Yang, ZHU Jiang-feng, LI Jiang, *et al.* High power passively q-switched laser of diode-pumped domestic Yb: YAG ceramic[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(10): 50-55.
于洋, 朱江峰, 李江, 等. 二极管抽运国产 Yb: YAG 陶瓷高功率被动调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2016, **43**(10): 50-55.
- [7] LATHAM W P, LOBAD A, NEWELL T C, *et al.* 6.5 kW, Yb: YAG ceramic thin disk laser[A]. AIP, 2010: 758-764.
- [8] NUBBEMEYER T, KAUMANN M, UEFFING M, *et al.* 1 kW, 200 mJ picosecond thin-disk laser system[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(7): 1381-1384.
- [9] PETERSON P, GAVRIELIDES A, NEWELL T C, *et al.* ASE in thin disk lasers: theory and experiment[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(25): 25672-25684.
- [10] 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.
- [11] PIEHLER S, DIETRICH T, RUMPEL M, *et al.* Highly efficient 400 W near-fundamental-mode green thin-disk laser

- [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(1): 171.
- [12] GIESEN A. High-power thin-disk lasers[C]. SPIE, 2007, 8547: 750-751.
- [13] KUZNETSOV I I, MUKHIN I B, PALASHOV O V. Improvement of thermal management in the composite Yb: YAG/YAG thin-disk laser[J]. *Laser Physics*, 2016, **26**(4): 45004.
- [14] HUSAIN A, KIM K Y. Shape optimization of micro-channel heat sink for micro-electronic cooling [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, 2008, **31**(2):322-330.
- [15] BRUNSCHWILER T, ROTHUIZEN H, FABBRI M, *et al.* Direct liquid jet-impingement cooling with micron-sized nozzle array and distributed return architecture[C]. Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems, 2006. ITherm 2006. IEEE, 2006: 196-203.
- [16] WANG E N, ZHANG L, JIANG L, *et al.* Micromachined jets for liquid impingement cooling of VLSI chips[J]. *Journal of Microelectromechanical systems*, 2004, **13**(5): 833-842.
- [17] SHAO Na, ZHU Xiao, ZHU Guang-zhi, *et al.* Study on jet array impingement cooling for crystal module of thin disk laser[J]. *Laser Technology*, 2016, **40**(5): 695-700.
邵娜,朱晓,朱广志,等. 碟片激光器晶体模块阵列射流冲击冷却的研究[J]. 激光技术, 2016, **40**(5): 695-700.
- [18] HUSAIN A, KIM K Y. Shape optimization of micro-channel heat sink for micro-electronic cooling [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, 2008, **31**(2):322-330.
- [19] BRUNSCHWILER T, ROTHUIZEN H, FABBRI M, *et al.* Direct liquid jet-impingement cooling with micron-sized nozzle array and distributed return architecture[C]. Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems, 2006. ITherm 2006. IEEE, 2006: 196-203.
- [20] BOSTANCI H, VAN EE D, SAARLOOS B A, *et al.* Spray cooling of power electronics using high temperature coolant and enhanced surface[C]. 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, IEEE, 2009: 609-613.
- [21] YI Jia-yu, TU Bo, CAO Hai-xia *et al.* Design and experiment on high-power direct-liquid-cooled thin-disk solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, **45**(12):1201004.
易家玉,涂波,曹海霞等. 高功率直接液冷固体薄片激光器的设计与实验[J]. 中国激光, 2018, **45**(12):24-34.
- [22] FU X, LI P, LIU Q, *et al.* 3kW liquid-cooled elastically-supported Nd: YAG multi-slab CW laser resonator[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(15): 18421-18432.
- [23] WANG K, TU B, JIA C, *et al.* 7kW direct-liquid-cooled side-pumped Nd: YAG multi-disk laser resonator[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(13): 15012-15020.
- [24] YANG Peng, MA Lun, JIANG Yan-ling, *et al.* Thermal management technology of a liquid cooling thin-disk oscillator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(3):40-44.
杨鹏,马仑,姜彦玲,等. 液冷薄片构型激光器及其热管理技术[J]. 光子学报, 2016, **45**(3):40-44.
- [25] WANG Chun-hua, WANG Wei-min, MA Yi, *et al.* Design and experiment of multi-pass pump system for Yb: YAG thin-disk laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4): 553-558.
王春华,王卫民,马毅,等. Yb: YAG 薄片激光器多通泵浦耦合系统设计与实验[J]. 强激光与粒子束 2006, **18**(4): 553-558.