

高功率金刚石拉曼激光器热效应数值模拟

张飞 郑浩 李鹏飞 陈晖 丁洁 齐瑶瑶 颜秉政 王雨雷 吕志伟 白振旭

Numerical simulation of thermal effects in high-power diamond Raman lasers

ZHANG Fei, ZHENG Hao, LI Pengfei, CHEN Hui, DING Jie, QI Yaoyao, YAN Bingzheng, WANG Yulei, LYU Zhiwei, BAI Zhenxu

引用本文:

张飞,郑浩,李鹏飞,等.高功率金刚石拉曼激光器热效应数值模拟[J].*应用光学*,2023,44(6):1201–1211. DOI: 10.5768/JAO202344.0610006

ZHANG Fei, ZHENG Hao, LI Pengfei, et al. Numerical simulation of thermal effects in high-power diamond Raman lasers[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(6): 1201–1211. DOI: 10.5768/JAO202344.0610006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率固体激光器增益非均匀分布引起的效能亏损效应研究

Efficiency loss induced by non-uniform gain distribution in high power solid state lasers

应用光学. 2019, 40(4): 542–550 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401003>

大尺寸太赫兹平顶波束的产生研究

Generation of large-size terahertz flat-topped beam

应用光学. 2021, 42(4): 622–629 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401008>

中波红外光学系统无热化设计和冷反射抑制

Athermalization and suppression of narcissus for medium-wave infrared optical system

应用光学. 2017, 38(3): 352–357 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0301003>

空间外差拉曼光谱仪成像镜头光机热集成分析

Thermal/ structural/optical integrated analysis on spatial heterodyne Raman spectrometer imaging lens

应用光学. 2018, 39(3): 332–338 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0301006>

高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生

High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum

应用光学. 2018, 39(6): 916–920 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607001>

高能高功率激光参数测量技术研究

Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser

应用光学. 2020, 41(4): 645–650 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1201-11

高功率金刚石拉曼激光器热效应数值模拟

张 飞^{1,2}, 郑 浩^{1,2}, 李鹏飞^{1,2}, 陈 晖^{1,2}, 丁 洁^{1,2}, 齐瑶瑶^{1,2},
颜秉政^{1,2}, 王雨雷^{1,2}, 吕志伟^{1,2}, 白振旭^{1,2}

(1. 河北工业大学 先进激光技术研究中心, 天津 300401; 2. 河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401)

摘要: 金刚石晶体不仅具有极佳的光学性质, 同时也拥有极高的热导率和低的热膨胀系数, 这使得金刚石激光器成为实现不受热影响高功率激光输出的重要路径。但随着激光功率的进一步提升, 金刚石拉曼激光器中仍然存在不可忽视的热效应等问题, 这对金刚石激光器性能提升提出了挑战。针对高功率运转情况下金刚石拉曼激光器的热效应进行了理论研究, 根据热传导方程并采用有限元分析方法, 模拟了金刚石温度、热应力以及热形变分布, 分析了泵浦参数、晶体参数对金刚石温度、热应力、热形变的影响。此外, 基于石墨片横向导热特性, 设计了一种新型的用于金刚石晶体的热沉结构。与传统单一铜片散热方式相比, 在泵浦功率 800 W、束腰半径 40 μm 条件下, 金刚石中心温度下降了 10.16 K, 下表面平均应力降低了 19.857 MPa, 端面平均形变量减小了 0.055 μm。数值模拟结果表明, 该方法对缓解金刚石激光的热效应, 实现金刚石拉曼激光器输出功率的进一步提升和高光束质量激光输出具有重要指导意义。

关键词: 金刚石; 拉曼激光器; 高功率; 热效应; 数值仿真; 热沉

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202344.0610006](https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610006)

Numerical simulation of thermal effects in high-power diamond Raman lasers

ZHANG Fei^{1,2}, ZHENG Hao^{1,2}, LI Pengfei^{1,2}, CHEN Hui^{1,2}, DING Jie^{1,2}, QI Yaoyao^{1,2},
YAN Bingzheng^{1,2}, WANG Yulei^{1,2}, LYU Zhiwei^{1,2}, BAI Zhenxu^{1,2}

(1. Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Hebei Key
Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China)

Abstract: Diamond crystals not only have excellent optical properties, but also have extremely high thermal conductivity and low thermal expansion coefficient, which makes diamond laser an important path to achieve high-power laser output without heat. However, with the further increase of laser power, thermal effects that cannot be ignored in diamond Raman lasers (DRLs), which poses a challenge to the performance improvement of diamond lasers. The thermal effect of the DRLs under high power operation was studied theoretically. Based on the thermal conduction equation and finite element analysis method, the temperature, thermal stress and thermal deformation distribution of diamond were simulated, and the effects of pump and crystal parameters on the above factors were analyzed. Moreover, a novel heat sink structure for diamond was designed based on the transverse thermal conductivity characteristics of graphite sheets. Compared with traditional heat dissipation methods of single copper-sheet, under the pump power of 800 W and waist radius of 40 μm, the center temperature of the diamond was reduced by 10.16 K, the average stress on the lower surface was reduced by 19.857 MPa, and the average deformation of the end face was reduced by 0.055 μm. The numerical simulation results show that this method has important guiding significance for mitigating the thermal effect of diamond

收稿日期: 2023-07-14; 修回日期: 2023-10-12

基金项目: 国家自然科学基金 (61927815); 天津市自然科学基金 (22JCYBJC01100); 河北省自然科学基金 (F2023202063); 量子光学与光量子器件国家重点实验室开放课题 (KF202201); 河北工业大学基本科研业务费 (JBKYTD2201)

作者简介: 张飞 (1994—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率金刚石拉曼激光器研究。E-mail: 1607794625@qq.com

通信作者: 白振旭 (1987—), 男, 博士, 教授, 主要从事高功率激光技术与新型激光器研究。E-mail: baizhenxu@hotmail.com

laser, further enhancing the output power of DRLs and achieving high beam quality laser output.

Key words: diamond; Raman laser; high power; thermal effect; numerical simulation; heat sink

引言

高光束质量的大功率激光器在材料加工、武器装备、空间探测等领域具有重要的应用^[1-3]。其中,拉曼激光器利用其固有的频移、自相位匹配以及光束净化特性,在实现高功率、高光束质量以及特殊波长激光方面受到了广泛关注,并填补了传统大功率激光器在诸多应用领域的空白^[4-7]。作为目前被广泛关注的非线性光学晶体,金刚石晶体拥有高拉曼增益系数($10 \text{ cm/GW@1 } \mu\text{m}$)、窄拉曼增益线宽(1.5 cm^{-1})、高热导率($2200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)和低热膨胀系数($1.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)等特点,因此被认为是获得高转换效率的高功率、窄线宽、高光束质量激光输出的理想拉曼材料^[8-11]。

金刚石热导率大约是常见拉曼晶体的几十倍甚至上百倍,这使得金刚石拉曼激光器(diamond Raman laser, DRL)可以在受热影响较低的情况下,实现比其他晶体拉曼激光器更高的光束质量和功率输出^[7,12-14]。通常在低功率运转情况下,随着泵浦光功率的提升,沉积在金刚石中的热量不足以产生明显的热效应,因此 Stokes 光的光束质量和输出功率均不会出现退化。但是,受制于目前人造金刚石晶体有限的通光口径(通常为 mm^2 量级),为了降低 DRL 的产生阈值、提高转换效率或实现级联拉曼转换,通常采用紧聚焦方式对金刚石晶体进行泵浦^[14-19]。因此,尽管金刚石的热性能远优于常用晶体,其内部超高的功率密度使得研究人员仍然在高功率 DRL 中观察到了热效应。2015 年,澳大利亚麦考瑞大学的 WILLIAMS R J 等人分别采用脉冲和连续波双通泵浦方式对外腔 DRL 开展研究,在泵浦功率为 300 W 时获得了 138 W 的 Stokes 光输出。实验发现,由于受到金刚石热效应的影响,在输出拉曼光中观察到了较大的噪声^[20]。2016 年,俄罗斯科学院的 PASHININ V P 等人采用 1 064 nm 纳秒脉冲激光器泵浦外腔 DRL,在实验中观察到,当泵浦能量超过 4 mJ 时,一阶 Stokes 光的转换效率随泵浦能量的增加呈下降趋势。通过分析热透镜相关理论,作者认为光转换效率的下降是由金刚石热透镜效应造成的^[21]。2019 年,麦考瑞大学 ANTIPOV S 等人利用 1.064 μm 准连续激光器泵浦外腔 DRL,获得了稳态功率 1.2 kW 的一阶 Stokes 光输出^[14]。实验中发现,当一阶 Stokes

光输出功率超过 0.4 kW 时,持续增加泵浦功率,其输出 Stokes 光的光束质量因子会明显下降。随后作者通过对谐振腔内光束传播模式进行分析得出,要想引起泵浦 Stokes 重叠面积发生显著变化,至少需要 10 屈光度的热透镜强度,而实验计算的金刚石热透镜强度达到 14.6 屈光度,该研究结果充分证明了金刚石晶体中存在热透镜效应。2020 年,该课题组使用相同的实验装置,在输出功率高达 1.1 kW 的 DRL 中对热透镜效应和输出光束进行分析。研究发现,随着输出功率的增大,Stokes 光的光束质量因子和发散角会减小。通过引入校正因子,进一步解释了泵浦光和 Stokes 光束尺寸的不匹配与金刚石晶体的热效应直接相关^[22]。

上述报道中不难发现,泵浦功率的增加会导致激光器内部热积累随之增加,通常在激光增益介质和非线性增益介质中表现最为明显。这种热积累会导致热透镜、热致双折射、光束畸变以及光谱展宽等负面效应,甚至影响谐振腔的稳定性,并引起输出功率降低和光束质量下降^[7,23-25]。特别是当 DRL 的输出功率达到百瓦至千瓦量级时,金刚石的热效应就成为了限制激光器输出功率提高和光束质量提升的关键因素^[26-27]。因此,若想要金刚石激光器获取更高功率的激光输出,进一步研究金刚石的热量转化和传递过程,以及采取相应的热效应管理措施是非常有必要的。

目前,很多方法被用来降低激光器的热效应,如提高泵浦转化效率(如同带泵浦^[28])、改变增益介质几何结构(如光纤^[29-30]、板条^[31-32]和碟片^[33-34])、优化谐振腔设计方案(如设计外腔结构以促进晶体散热^[26]、改变输出镜透过率以减少谐振腔腔内功率密度^[35]、插入额外元件进行热补偿^[36])以及增强热沉散热能力(如使用液氮冷却和微通道冷却^[37-38])。可以看出,研究人员对于高功率激光器热效应管理主要围绕泵浦源、增益介质、谐振腔以及热沉四个方面开展研究。其中热沉散热更适用于非线性光学晶体,且具有更强的灵活性,研究和提升空间大。传统的热沉结构是在晶体的垂直方向上加铜片通水散热,在水平方向进行空气对流散热,然而空气的对流换热系数($5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \sim 10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)很小,水平降温效果不明显。因此,如果能找到一种材料,其水平方向上热导率很高,替换掉空气,

理论上就能够提高激光器的散热能力。石墨片是一种各向异性的晶体,其结构呈网状分布,在垂直方向,石墨片声子振动热振幅很小,其纵向热导率仅为 $35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;但在水平方向,声子振动热振幅很大,横向热导率甚至可达 $2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 以上^[39]。特别的是,将石墨片剥离成单层的石墨烯,其热导率甚至能达到 $5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 以上。因此,在横向散热方面,石墨片是一种很有前景的散热材料。但是目前研究人员对超高功率 DRL 的热效应研究较少,尤其是利用石墨片作为金刚石的辅助热沉,还未曾有过相关报道。

本文利用石墨片设计了一种新型热沉结构,对高功率下 DRL 热效应进行了理论研究,模拟了金刚石温度、热应力以及热形变分布,分析了泵浦参数、晶体参数对金刚石温度、热应力、热形变的影响,并与传统热沉结构散热能力进行了比较。结果表明,与传统单一铜片散热方式相比,新型结构下激光器热效应有明显改善。该研究结果对高功率金刚石拉曼激光热缓解具有重要指导意义。

1 模型的建立

1.1 系统结构

模型采用的外腔 DRL 结构如图 1(a) 所示。泵浦光首先被聚焦到金刚石晶体的中心,在谐振腔的作用下产生 Stokes 光输出。为使金刚石晶体吸收泵浦光后产生的热量尽快散失,根据金刚石的尺寸,以金刚石中心为坐标原点,构建了合适的热沉结构模型,如图 1(b) 所示。

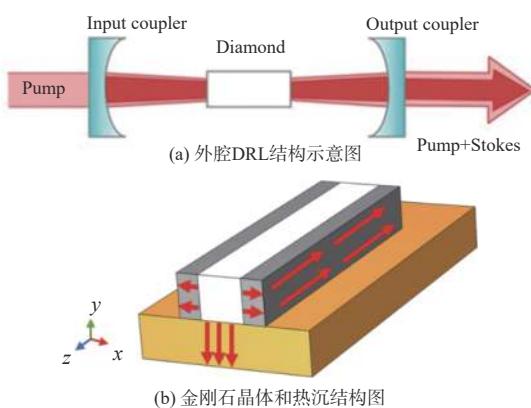


图 1 金刚石拉曼激光器模型

Fig. 1 Diamond Raman laser model

金刚石晶体放置在铜块散热器上,在金刚石晶体的左右两侧分别放置一块石墨片。金刚石晶体产生的热量在竖直方向上流向铜片,在水平方向

上主要流向石墨片,剩余热量通过晶体其余三面与空气的热交换排出。设定金刚石、铜片以及石墨片的初始温度和环境温度相同。

1.2 温度场理论

金刚石拉曼激光器运转时,在直角坐标系下建立热传导方程^[26-27,29]如下:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial z^2} \right) + q_v(x,y,z) \quad (1)$$

初始条件和边界条件分别为

$$\begin{cases} T|_{t=0} = T_0 \\ -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\Sigma_1} = h(T - T_0) \\ -k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\Sigma_2, \Sigma_3} = h(T - T_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 表示温度; t 表示时间; $q_v(x,y,z)$ 表示热源功率密度; ρ 为金刚石密度; c 为金刚石比热容; k 为金刚石热导率; T_0 为环境初始温度; Σ_1 为金刚石上表面; Σ_2 为金刚石前表面; Σ_3 为金刚石后表面; h 为空气对流换热系数。

在 DRL 中,金刚石晶体中的热积累量是根据输入的泵浦光、剩余泵浦光(未参与拉曼转换过程的泵浦光,其中包括泵浦光散射、透射不完全等)以及产生的 Stokes 光(参与拉曼转换过程得到的 Stokes,其中包括 Stokes 光输出、散射、透射不完全等)计算确定的。根据能量守恒定律,泵浦光在拉曼转换过程中满足下式:

$$P_{\text{pump}} = P_S + P_{\text{res}} + P_h \quad (3)$$

式中: P_{pump} 是输入的泵浦功率; P_S 是产生的 Stokes 光功率; P_{res} 是剩余泵浦功率; P_h 是沉积在金刚石中的热量。泵浦光在金刚石中传输时,拉曼产生的光学声子衰减以及杂质对泵浦光和 Stokes 光的非均匀吸收,使得金刚石内部不同位置处的热积累量不同。为了更准确地估计金刚石的热积累量,泵浦光采用高斯热源模型,该模型比固体激光散热研究中广泛接受的点热源模型更接近实际泵浦光束特性,其热量在金刚石中的传导与泵浦光的高斯分布有关^[40],则有:

$$q_v(x,y,z) = C e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2}} \quad (4)$$

式中未知变量 C 由下述公式确定。为了简化计算,假设沉积金刚石中的热量沿晶体长度均匀分布,则金刚石的热功率密度满足下式:

$$\iint q_v(x,y) dx dy = \frac{P_h}{l} \quad (5)$$

式中 l 为晶体长度。根据高斯光束的传播定理, 我们可以通过计算得到聚焦后任意 z 位置处的光斑半径为

$$w(z) = w(0) \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_p}\right)^2} \quad (6)$$

式中: $w(z)$ 为光斑半径; $w(0)$ 为泵浦光束腰半径; z_p 表示光束的瑞利长度, 其表达式如下:

$$z_p = \frac{\pi n w^2(0)}{M^2 \lambda} \quad (7)$$

式中: n 为折射率; M^2 为光束质量因子; λ 为泵浦波长。将 $w(z)$ 作为二重积分区域, 代入式(5)得到热源功率表达式:

$$q_v(x, y, z) = \frac{P_h e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2}}}{2\pi l \left[1 - e^{-\frac{-w(0)^2(1+\frac{z^2(M^2)^2\lambda^2}{\pi^2 n^2 w(0)^4})}{2}} \right]} \quad (8)$$

在金刚石热仿真中, 模型计算的是瞬态结果, 时间是 700 μs, 此外还考虑了金刚石与散热器的热传递以及空气的自然对流。**表 1** 提供了本论文开展数值分析中使用的晶体、热沉和振荡器的参数。

表 1 金刚石热模拟中的相关参数^[40]

Table 1 Parameters used in diamond thermal simulation^[40]

	参数	值
金刚石	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2200
	热膨胀系数/K	1.1×10 ⁻⁶
	密度/(g·cm ⁻³)	3.515
	比热容/(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	520
	杨氏模量/GPa	1050
	泊松比	0.069
铜	尺寸/mm	7×1×1
	折射率	2.38
	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	385
石墨片	尺寸/mm	9×4×1
	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2000、35
	尺寸/mm	7×1×0.5
金刚石拉曼激光器	泵浦功率/W	800
	输出功率/W	320
	剩余泵浦功率/W	80
	光束质量因子	1.3
	泵浦波长/nm	1064
	泵浦束腰半径/μm	40
环境	温度/K	295.15
	空气对流换热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	10

1.3 应力场理论

当泵浦光入射到晶体中时, 部分能量被吸收, 其余能量转化为热量。这些热量不均匀地分布在晶体内部, 导致温度分布以及晶体热膨胀不均匀。晶体温度变化不均匀引起的热应力和热形变的大小可以通过热应力耦合分析来求解, 晶体的位置和应力状态由一组热弹性方程确定, 包括几何、物理、和平衡微分方程^[26, 40-41]。形变与位移的关系可以用几何方程来描述, 即:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\ \gamma_{yz} = \frac{\gamma_{yz}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ \gamma_{zx} = \frac{\gamma_{zx}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 分别为晶体在 x 、 y 、 z 方向上的位移分量; ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为晶体在 x 、 y 、 z 方向上的形变分量; γ_{xy} 、 γ_{yz} 、 γ_{zx} 分别为晶体在 3 个平面上的剪切形变分量。

温度引起的应力与应变关系满足胡克定律, 可以用物理方程来描述:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha_T \Delta T \\ \sigma_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha_T \Delta T \\ \sigma_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha_T \Delta T \end{cases} \quad (10)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad (11)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (12)$$

式中: σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为晶体在 x 、 y 、 z 方向上的应力分量; μ 为泊松比; E 为晶体的杨氏模量; α_T 为晶体的热膨胀系数; ΔT 为温度变化; G 为剪切弹性模量。

当金刚石晶体处于平衡状态时, 晶体满足流体静力平衡条件:

$$\sum X = \sum Y = \sum Z = \sum M_x = \sum M_y = \sum M_z = 0 \quad (13)$$

利用静力矩 $\Sigma M_x = \Sigma M_y = \Sigma M_z = 0$ 的平衡条件, 可得:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (14)$$

利用位移平衡条件 $\Sigma X = \Sigma Y = \Sigma Z = 0$, 可以得到晶体 x 、 y 、 z 方向力的平衡微分方程, 分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0 \end{array} \right. \quad (15)$$

式中 F_x 、 F_y 、 F_z 分别是作用在金刚石晶体 x 、 y 、 z 方向上的应力分量。

2 温度场分析

2.1 金刚石温度分布

充分了解金刚石温度分布情况对于如何高效开展 DRL 热效应管理措施是极其重要的, 因此首先对金刚石进行了温度场模拟。图 2(a) 是金刚石表面温度分布图, 最高温度位于泵浦端面中心, 达到 316.23 K, 相对于环境温度被提高了 21 K。图 2(b) 是金刚石 X-Z 截面温度分布图, 最高温度达到 303.53 K, 位于上表面中心处, 这是因为石墨片和铜片的散热能力远强于上表面空气的散热能力。

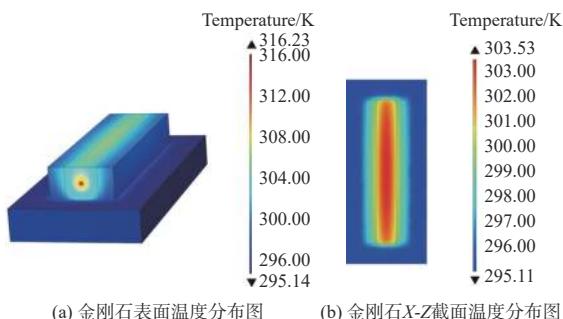


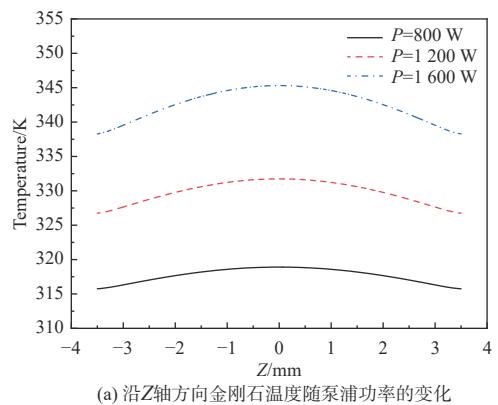
图 2 金刚石温度分布

Fig. 2 Diamond temperature distribution

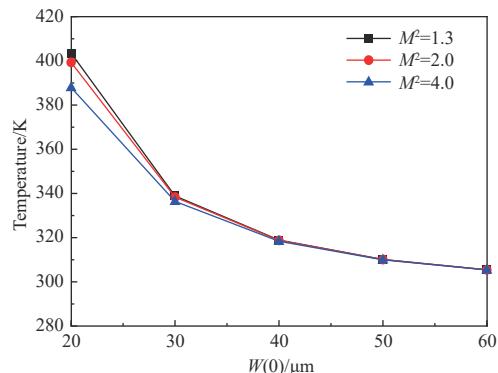
2.2 金刚石温度影响因素

金刚石内部温度场发生变化会导致诸如热透镜、热致双折射等负面效应, 造成 Stokes 光功率以及光束质量下降等。因此, 分析金刚石温度场的影响因素至关重要。图 3(a) 给出了沿 Z 轴方向金刚石温度随泵浦功率的变化结果。当泵浦功率分别为 800 W、1 200 W、1 600 W 时, 金刚石中心的最大温升依次为 318.91 K、331.74 K、345.31 K, 金刚石中心与金刚石端面中心的温差分别为 3.16 K、4.99 K、17.02 K。可见, 金刚石中心温度随着泵浦光功率的增加会升高, 且金刚石中心和端面中心处的温差也会随之变大。因此, 可以通过合理降低泵浦光功率使得金刚石内部温度均匀分布, 以获得更好的光束质量输出。此外, 从图中可以看

到, 在不同的中心温度下, 金刚石内部的温度场分布规律是一致的, 均是中心处温度最高, 沿着中心向 2 个端面温度逐渐降低。图 3(b) 是泵浦光束腰半径和泵浦光束质量与金刚石中心温度关系图。从图中可以看出, 在相同泵浦功率下, 金刚石中心温度与束腰半径成反比, 这是因为当泵浦光总功率一定时, 泵浦光束腰半径减小使得金刚石中心功率密度增加, 从而造成热负载增加。因此, 在激光器谐振腔设计过程中, 当增加泵浦光和 Stokes 光斑重叠面积以获得更高的效率时, 也要考虑泵浦光半径对激光器热效应的影响。此外, 模拟结果显示, 对于同一泵浦光半径, 泵浦光束质量因子的改变对金刚石中心温度几乎没有影响, 因此在分析泵浦光参数对金刚石的温度场影响因素时, 泵浦光束质量可以不作为关键因素进行考虑。



(a) 沿 Z 轴方向金刚石温度随泵浦功率的变化



(b) 金刚石中心温度随泵浦光束腰半径和泵浦光束质量的变化

Fig. 3 Effect of pump parameters on temperature

金刚石热积累除了与泵浦光参数有关, 还受泵浦光在增益介质中传输光程的影响。图 4(a) 展示了金刚石中心温度与金刚石长度关系, 从图中可以看出, 金刚石中心温度随金刚石长度增加而减小。金刚石增加长度, 一方面提高了泵浦光向

Stokes 光的转换效率,从而减少了热量积累;另一方面增加了与铜散热器的接触面积,扩大了热量传递范围。图 4(b)为金刚石中心温度与金刚石宽度及高度关系图,当金刚石高度一定时,金刚石的中心温度与金刚石宽度成反比,即增加宽度会增加金刚石与铜片之间的接触面积,散热能力会得到增强。当金刚石的宽度为固定值时,温度随金刚石高度的增加而减小,这是因为金刚石的侧面与石墨片接触,相当于增加了热源与石墨片之间的接触面积,使得散热能力增强。

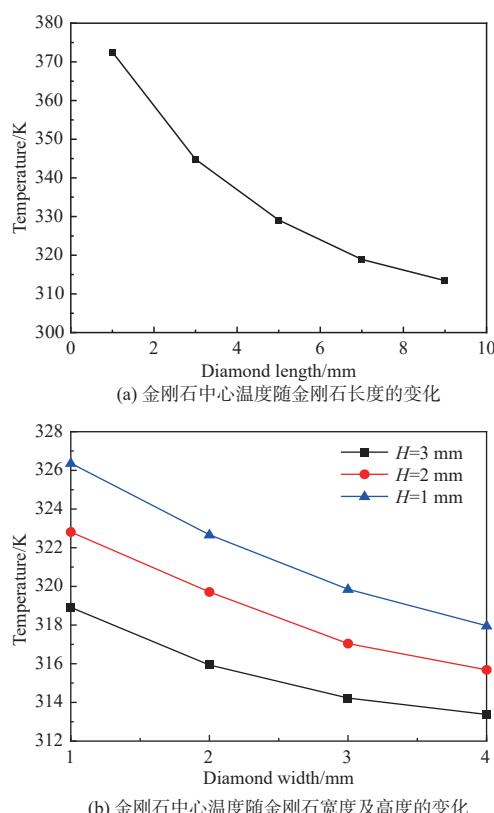


图 4 金刚石尺寸对温度的影响

Fig. 4 Effect of diamond size on temperature

3 热应力分析

3.1 金刚石热应力分布

DRL 在高功率运转的过程中,拉曼产生的光学声子衰减以及杂质对泵浦光和 Stokes 光的非均匀吸收,使得金刚石内部不同位置处会产生温度梯度,进而形成热应力。因此,掌握金刚石的应力分布,对处理应力进而避免金刚石的损坏十分必要。图 5(a)是金刚石表面应力分布图,最大应力约为 32.28 MPa。应力主要集中在底面和侧面,这是因为热应力的分布与金刚石内部温差是紧密相

关的。铜和石墨片的引入使得金刚石和各自的接触面上形成较大的温差,从而形成较大的热应力。这也和图 5(b)沿 X-Z 截面金刚石应力分布结果一致。

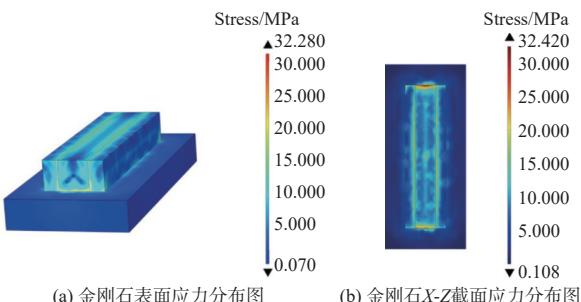


图 5 金刚石应力分布

Fig. 5 Diamond stress distribution

3.2 金刚石热应力影响因素

与温度场分布类似,针对泵浦功率、泵浦束腰尺寸、泵浦光光束质量对金刚石应力场的影响展开了讨论。图 6(a)显示了沿 Z 轴方向金刚石应力与泵浦功率的关系。当泵浦功率分别为 800 W、1 200 W、1 600 W 时,金刚石中心的最大热应力依次为 8.42 MPa、13.07 MPa、16.41 MPa,对应端面中心热应力分别为 1.15 MPa、1.74 MPa、2.30 MPa。可见,金刚石整体热应力以及中心应力与端面应力之差都是随着泵浦功率的增加而增大。此外,从图中也可看出,金刚石的热应力变化速度随泵浦功率的增加而加快,导致热应力分布发生明显变化。图 6(b)是泵浦光束腰半径和泵浦光光束质量与金刚石底面应力关系图。从图中可以看出,随着泵浦束腰半径增大,金刚石底面热应力大小逐渐减小,且热应力分布随着泵浦束腰半径的增大而变得更加均匀。因此,可以通过合理增大泵浦光束腰半径,来改善金刚石内部热应力不均匀分布,以避免过大的热应力损坏金刚石。此外,从结果也能看出,当 M^2 小于 4 且泵浦半径小于 40 μm 时,金刚石热应力随着泵浦光光束质量数值的增加明显减小。但当泵浦半径大于 40 μm 时,泵浦光光束质量的改变对金刚石热应力几乎没有影响,因此分析泵浦光光束质量对金刚石热应力的影响要结合泵浦半径一起考虑。

同样,本文也模拟了金刚石尺寸对应力场的影响,如图 7 所示。从图 7 中曲线分布趋势可以看出,金刚石长宽高对热应力的影响与对温度场的影响基本是一致的,因此同样可以得出类似的结论,即在该模型的前提下,增加金刚石的长度、宽度以及高度有利于减小金刚石的热应力。

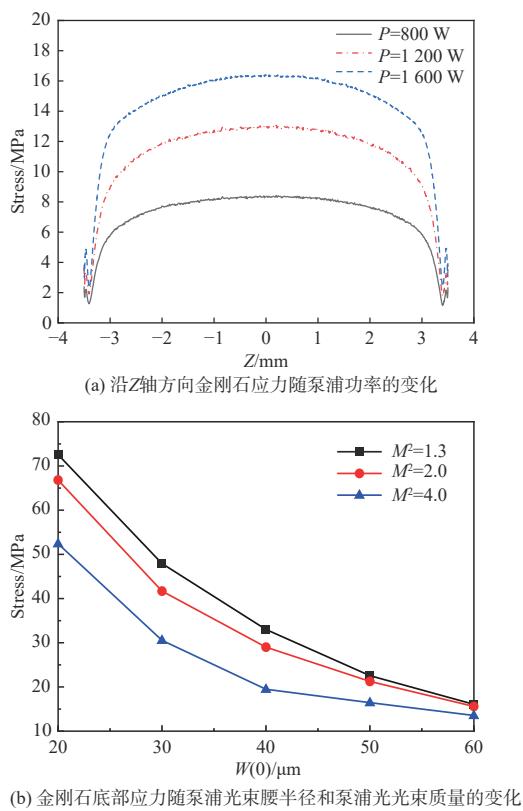


图 6 泵浦参数对应力的影响

Fig. 6 Effect of pump parameters on stress

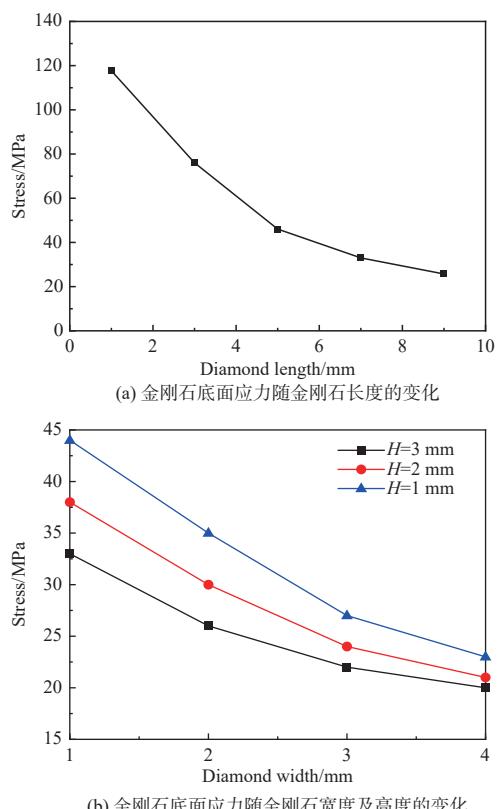


图 7 金刚石尺寸对应力的影响

Fig. 7 Effect of diamond size on stress

4 热形变分析

4.1 金刚石形变分布

温度梯度和热应力不均匀分布的存在还会造成金刚石不同位置处发生不同程度的形变。图 8 (a) 是金刚石表面形变分布图, 最大形变位于泵浦端面中心, 达到 $0.08 \mu\text{m}$, 离端面中心越远, 变形量越小。图 8 (b) 是金刚石 X-Z 截面上的形变分布图, 形变分布呈现出极其对称的特征, 最小的形变值是 $0.024 \mu\text{m}$, 发生在金刚石侧面。这一结果与式 (10) 揭示的规律是一致的, 变形与应力的关系满足胡克定律, 即热应力倾向于阻止热变形, 这也意味着热变形的分布将与热应力的分布相反^[24]。

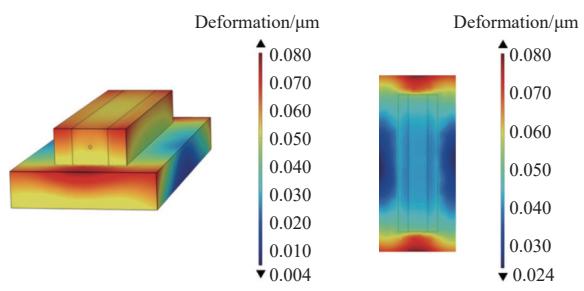


图 8 金刚石形变分布

Fig. 8 Deformation distribution of diamond

4.2 金刚石形变影响因素

与应力场分布类似, 本文也研究了泵浦功率、泵浦束腰尺寸以及泵浦光束质量对金刚石热形变的影响。图 9 (a) 是沿着 Z 轴方向, 金刚石形变量与泵浦功率关系图。当泵浦功率分别为 800 W、1 200 W、1 600 W 时, 金刚石端面的最大热形变依次为 $0.058 \mu\text{m}$ 、 $0.088 \mu\text{m}$ 、 $0.117 \mu\text{m}$, 对应中心热形变分别为 $0.046 \mu\text{m}$ 、 $0.069 \mu\text{m}$ 、 $0.093 \mu\text{m}$ 。可见, 随着泵浦功率的增加, 金刚石端面形变量与中心形变量的差值也越来越大, 热形变愈发严重, 端面中心处圆形凸包可能会变得越来越大。图 9 (b) 是泵浦束腰尺寸以及泵浦光束质量与金刚石端面热形变关系图, 随着泵浦束腰半径的增大, 端面形变量逐渐减小, 减小速度越来越慢。此外, 从图 9(b) 中可以看出, 当 M^2 小于 4 时, 泵浦光光束质量对金刚石热形变量的数值改变影响很小, 因此可以忽略其对激光器热效应的影响。

同样, 本文也模拟了金刚石尺寸对位移场的影响, 如图 10 所示。从图 10 中曲线分布趋势可以看出, 金刚石长宽高对热形变的影响与对温度场、应力场的影响是一致的, 因此同样可以得出类似的结论, 即在该模型前提下, 增加金刚石的长度、宽度以及高度有利于减小金刚石的热形变。

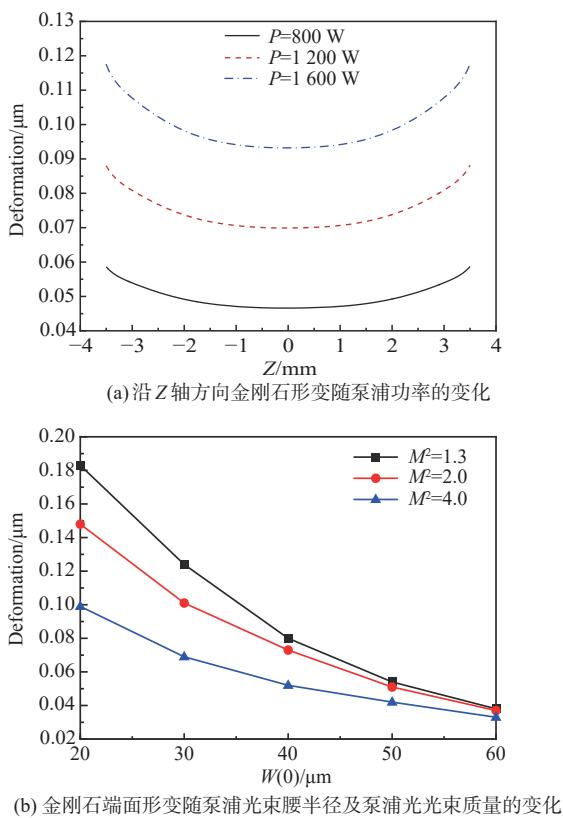


图 9 泵浦参数对形变的影响

Fig. 9 Effect of pump parameters on deformation

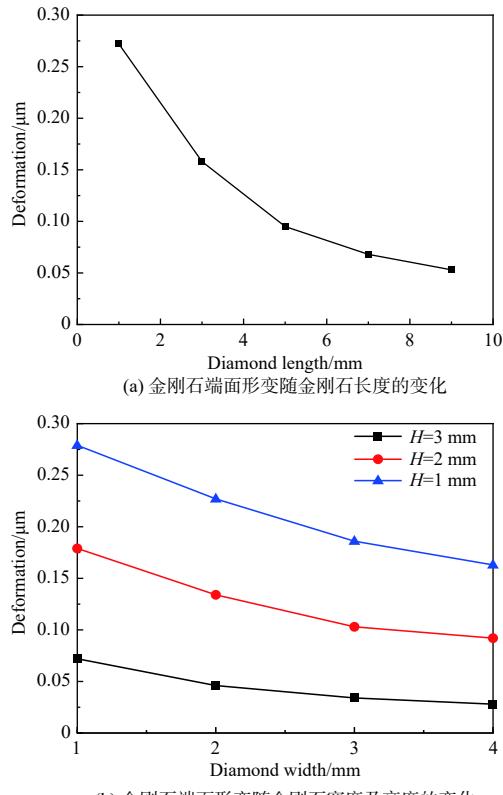


图 10 金刚石尺寸对形变的影响

Fig. 10 Effect of diamond size on deformation

5 热沉结构分析

本文基于图 1(b) 构建的模型, 在泵浦功率为 800 W、束腰半径 40 μm 的条件下, 模拟了金刚石中心温度、上表面温度以及两者温度梯度随时间的变化关系, 如图 11(a)~(c) 所示。在泵浦光作用下, 金刚石中心温度和上表面温度快速上升。由于金刚石超高热导率和外部散热器辅助, 大约在 50 μs 时, 金刚石中心温度和上表面温度差保持恒定, 大约为 13 K, 此后形成了稳定的温度梯度。虽然金刚石局部温度仍在持续上升, 但对拉曼线形和增益系数的影响微弱, 几百开尔文范围内的局部温度上升不会对拉曼转换造成显著影响^[20, 24]。此外, 为了反映石墨片对 DRL 热效应的缓解效果, 分别模拟了 3 种不同情况下(即只有铜片散热、铜片和 1 块石墨片散热、铜块和 2 块石墨片散热)金刚石中心温度、下表面平均应力以及端面平均形变量随时间变化情况, 结果如图 11(d)~(f) 所示。从图 11(d)~(f) 中可以看到, 3 种不同情况下金刚石处于温度梯度稳态时, 金刚石中心温度分别达到 329.77 K、323.39 K、319.11 K, 下表面平均应力分别达到 33.602 MPa、21.783 MPa、13.745 MPa, 端面平均形变量分别达到 0.114 μm、0.082 μm、0.059 μm。相比单一铜片, 2 块石墨片的引入使得

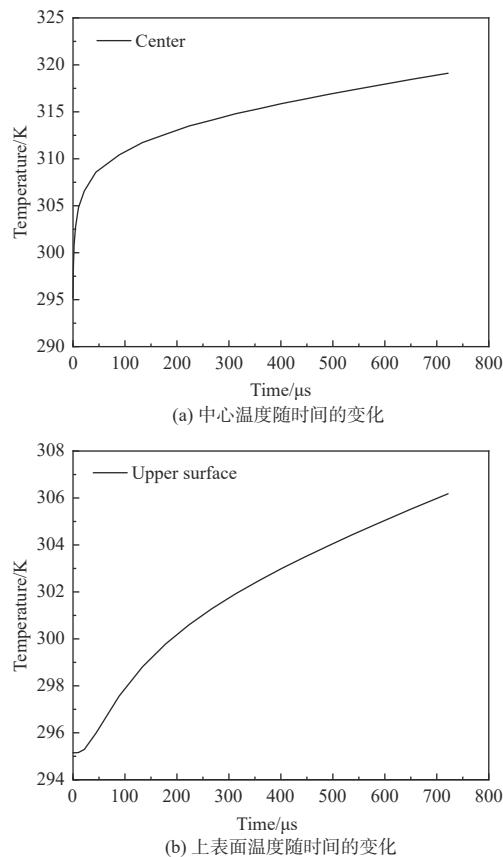


Fig. 11 Thermal沉降结构分析

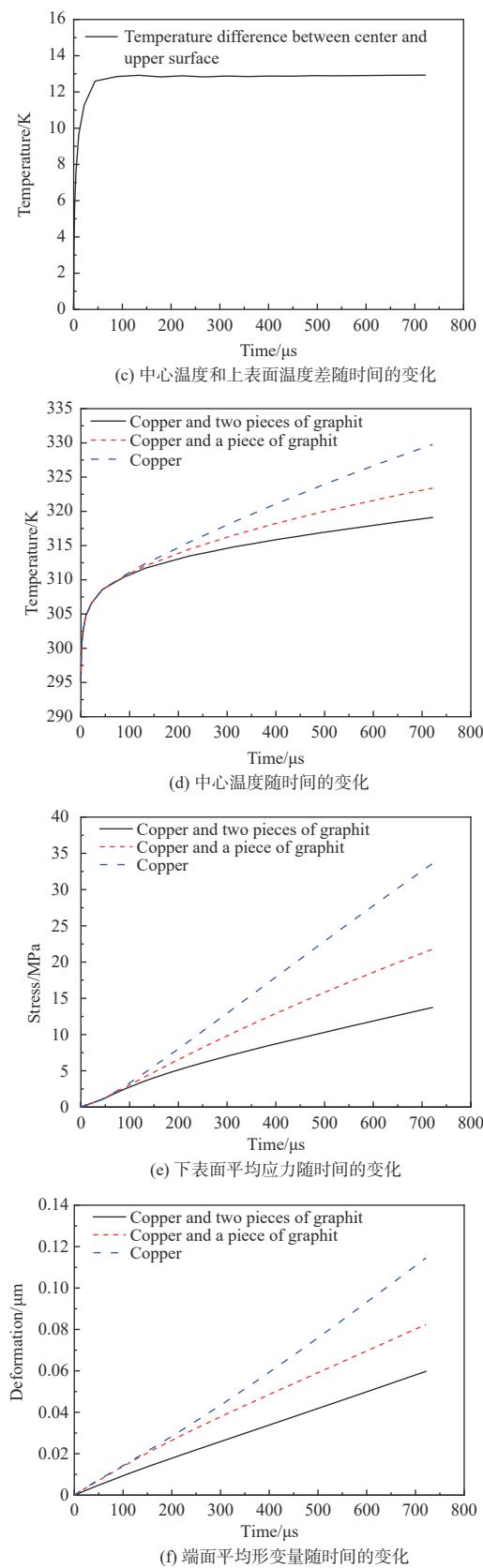


图 11 热沉结构对金刚石温度、应力以及形变的影响

Fig. 11 Effect of heat sink structure on temperature, stress and deformation of diamond

金刚石中心温度、下表面平均应力以及端面平均形变量分别降低了 10.16 K、19.857 MPa、0.055 μm，该结果充分表明了石墨片有利于缓解金刚石热效应。

6 结论

本文基于有限元分析方法和热弹性理论，建立了 DRL 热效应模型，模拟了金刚石温度分布、应力分布以及热形变分布，并分析了泵浦参数、晶体参数对模拟分布结果的影响。结果表明，通过合理改变泵浦参数（如降低泵浦功率、增加泵浦束腰尺）、增大金刚石尺寸，能够有效减少金刚石晶体内部产生的热量。

此外，利用石墨片的横向导热特性，在金刚石横向添加石墨片作为辅助热沉，能够有效提高金刚石横向散热能力。结果显示，与传统单一铜片散热方式相比，基于石墨片冷却的金刚石晶体中心温度下降了 10.16 K，下表面平均应力降低了 19.857 MPa，端面平均形变量减小了 0.055 μm，效果显著。本文的研究结果为缓解 DRL 热效应，进而获得高光束质量的拉曼激光输出提供了理论支撑，同时提出的晶体热效应计算和冷却方法对开展高功率晶体拉曼激光研究的人员具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] JAUREGUI C, LIMPERT J, TUNNERMANN A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [2] 丁宇, 姜峰, 郑荣山, 等. 美国高能激光武器发展概况(特邀)[J]. 光电技术应用, 2021, 36(6): 1-9.
DING Yu, JIANG Feng, ZHENG Rongshan, et al. Overview of high energy laser weapon development in USA (invited)[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2021, 36(6): 1-9.
- [3] 朱孟真, 陈霞, 刘旭, 等. 战术激光武器反无人机发展现状和关键技术分析[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(7): 20200230.
ZHU Mengzhen, CHEN Xia, LIU Xu, et al. Situation and key technology of tactical laser anti-UAV[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200230.
- [4] 周朴, 姚天甫, 范晨晨, 等. 拉曼光纤激光: 50年的历程、现状与趋势(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 20220015.

- ZHOU Pu, YAO Tianfu, FAN Chenchen, et al. 50th anniversary of Raman fiber laser: history, progress and prospect (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20220015.
- [5] SUPRADEEPA V R, FENG Y, NICHOLSON J W. Raman fiber lasers[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(2): 023001.
- [6] HUO X W, QI Y Y, ZHANG Y, et al. Research development of 589 nm laser for sodium laser guide stars[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106207.
- [7] 白振旭, 陈晖, 李宇琪, 等. 基于金刚石拉曼转换的光束亮度增强研究进展[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(1): 20200098.
- BAI Zhenxu, CHEN Hui, LI Yuqi, et al. Development of beam brightness enhancement based on diamond Raman conversion[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(1): 20200098.
- [8] 张亚凯, 陈晖, 白振旭, 等. 多波长红光金刚石拉曼激光器[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8): 20230329.
- ZHANG Yakai, CHEN Hui, BAI Zhenxu, et al. Multi-wavelength red diamond Raman laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(8): 20230329.
- [9] 白振旭, 杨学宗, 陈晖, 等. 高功率金刚石激光技术研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(12): 20201076.
- BAI Zhenxu, YANG Xuezong, CHEN Hui, et al. Research progress of high-power diamond laser technology (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201076.
- [10] WILLIAMS R J, KITZLER O, BAI Z X, et al. High power diamond Raman lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1602214.
- [11] JASBEER H, WILLIAMS R J, KITZLER O, et al. Wavelength diversification of high-power external cavity diamond Raman lasers using intracavity harmonic generation[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1930-1941.
- [12] SARANG S, RICHARDSON M. Power scaling of CW crystalline OPOs and Raman lasers[J]. *Photonics*, 2021, 8(12): 565-571.
- [13] 白振旭, 陈晖, 张展鹏, 等. 百瓦级1.2/1.5 μm双波长金刚石拉曼激光器(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(12): 20210685.
- BAI Zhenxu, CHEN Hui, ZHANG Zhanpeng, et al. Hundred-watt dual-wavelength diamond Raman laser at 1.2/1.5 μm (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 20210685.
- [14] ANTIPOV S, SABELLA A, WILLIAMS R J, et al. 1.2 kW quasi-steady-state diamond Raman laser pumped by an $M^2 = 15$ beam[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2506-2509.
- [15] BAI Z X, WILLIAMS R J, KITZLER O, et al. 302 W quasi-continuous cascaded diamond Raman laser at 15 microns with large brightness enhancement[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 19797-19803.
- [16] YANG X Z, KITZLER O, SPENCE D J, et al. Diamond sodium guide star laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1898-1901.
- [17] BAI Z X, WILLIAMS R J, JASBEER H, et al. Large brightness enhancement for quasi-continuous beams by diamond Raman laser conversion[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(3): 563-566.
- [18] 白振旭, 陈晖, 丁洁, 等. 基于空间光腔的高功率布里渊频率梳[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0415001.
- BAI Zhenxu, CHEN Hui, DING Jie, et al. High-power Brillouin frequency comb based on free-space optical cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0415001.
- [19] CHEN H, BAI Z X, CAI Y P, et al. Order controllable enhanced stimulated Brillouin scattering utilizing cascaded diamond Raman conversion[J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(9): 092202.
- [20] WILLIAMS R J, NOLD J, STRECKER M, et al. Efficient Raman frequency conversion of high-power fiber lasers in diamond[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(4): 405-411.
- [21] PASHININ V P, RALCHENKO V G, BOLSHAKOV A P, et al. External-cavity diamond Raman laser performance at 1 240 nm and 1 485 nm wavelengths with high pulse energy[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(6): 065001.
- [22] ANTIPOV S, WILLIAMS R J, SABELLA A, et al. Analysis of a thermal lens in a diamond Raman laser operating at 1.1 kW output power[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15232-15239.
- [23] MILDREN R, RABEAU J. Optical engineering of diamond[M]. Germany: John Wiley & Sons, 2013:353-384 .
- [24] MCKAY A, LIU H, KITZLER O, et al. An efficient 14.5 W diamond Raman laser at high pulse repetition rate with first (1 240 nm) and second (1 485 nm) Stokes output[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(10): 105801.

- [25] LI Y L, DING J, BAI Z X, et al. Diamond Raman laser: a promising high-beam-quality and low-thermal-effect laser[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e35.
- [26] BAI Z X, ZHANG Z P, WANG K, et al. Comprehensive thermal analysis of diamond in a high-power Raman cavity based on FVM-FEM coupled method[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(6): 1572-1579.
- [27] GONG Q X, ZHANG M X, LIN C N, et al. Analysis of thermal effects in kilowatt high power diamond Raman lasers[J]. *Crystals*, 2022, 12(12): 1824.
- [28] FROMZEL V, TER-GABRIELYAN N, DUBINSKII M. Efficient resonantly-clad-pumped laser based on a Er: YAG-core planar waveguide[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 3932-3937.
- [29] LIU J, WU J D, CHEN H L, et al. Short-pulsed Raman fiber laser and its dynamics[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, 64(1): 1-21.
- [30] YU W L, YAN P, XIAO Q R, et al. Power scalability of a continuous-wave high-power Er-Yb co-doped fiber amplifier pumped by Yb-doped fiber lasers[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(7): 2046-2055.
- [31] WANG Q C, LONG Q L, GAO Y A, et al. High-efficiency Ho:YLF slab laser with 125 W continuous-wave output power[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(26): 8046-8049.
- [32] MI S, LI J, WEI D, et al. 105 W continuous-wave diode-pumped Tm:YAP slab laser with high beam quality[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106847.
- [33] NAGEL S, METZGER B, BAUER D, et al. Thin-disk laser system operating above 10 kW at near fundamental mode beam quality[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 965-968.
- [34] AHMED M A, BEIROW F, LOESCHER A, et al. High-power thin-disk lasers emitting beams with axially symmetric polarizations[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(4): 835-846.
- [35] TU H, MA S H, HU Z G, et al. Efficient monolithic diamond Raman yellow laser at 572.5 nm[J]. *Optical Materials*, 2021, 114: 110912.
- [36] YAO Q Q, DONG Y, WANG Q, et al. Beam quality improvement by controlling thermal lens spherical aberration in an end-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2245-2249.
- [37] RAMESH K N, SHARMA T K, RAO G A P. Latest advancements in heat transfer enhancement in the micro-channel heat sinks: a review[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28(4): 3135-3165.
- [38] KIM K J, HAN B, BAR-COHEN A. Thermal and optical performance of cryogenically cooled laser diode bars mounted on pin-finned microcoolers[J]. *Applied Physics B*, 2021, 127: 1-9.
- [39] FANG J Y, ZHANG H, ZOU Y G, et al. Thermal management of a semiconductor laser array based on a graphite heat sink[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(28): 7708-7715.
- [40] DING J, LI Y L, CHEN H, et al. Thermal modeling of an external cavity diamond Raman laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156: 108578.
- [41] ZHANG H, WEN Y, ZHANG L, et al. Influences of pump spot radius and depth of focus on the thermal effect of Tm:YAP crystal[J]. *Current Optics and Photonics*, 2019, 3(5): 458-465.