

## 侧面折返泵浦多边形 Nd:YAG 薄片的热效应研究

陈巧<sup>1,2</sup>, 葛文琦<sup>1,2</sup>, 边圣伟<sup>3</sup>, 王天齐<sup>1</sup>, 邱基斯<sup>1\*</sup><sup>1</sup>中国科学院空天信息创新研究院光学工程研究部, 北京 100094;<sup>2</sup>中国科学院大学光电学院, 北京 100049;<sup>3</sup>中国电子科技集团公司第十一研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

**摘要** 针对热效应劣化激光光束质量、限制激光功率水平提升的问题,研究了激光二极管侧面折返泵浦的多边形 Nd:YAG 的热效应,进行了有限元数值模拟计算和实验研究。对于侧面 90°切割和 45°切割的两种多边形薄片增益介质,对比分析了在侧面泵浦方式下,介质轴向及径向的泵浦光吸收功率分布和温度分布。实验测量了侧面折返泵浦模式下,45°切割的增益介质的荧光分布、温度分布和热致波前畸变,实验结果与理论分析吻合。研究表明,侧面折返泵浦的 45°切割多边形薄片增益介质有利于实现储能近平顶分布,并进一步降低增益介质的热效应。

**关键词** 激光器;薄片增益介质;侧面泵浦;折返泵浦;热效应

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2101002

## 1 引言

全固态激光器在工业加工、医疗、科研等领域中应用广泛<sup>[1-4]</sup>。近年来,随着半导体激光器件的日趋成熟,半导体激光器泵浦的全固态激光器向着更高功率、更高光束质量的方向发展。然而,随着泵浦功率的增加,增益介质中会产生更多的热积累,进而引发较明显的热效应,影响光束质量和激光功率的进一步提升。为了降低热效应,研究人员提出了高效热管理<sup>[5-7]</sup>、直接泵浦<sup>[8-10]</sup>等方法,其中改进增益介质构型是直接有效的方法之一。现有的介质构型包括棒状、板条<sup>[11]</sup>和薄片等,其中薄片增益介质允许非常高的泵浦功率密度,且激光传输方向的温度梯度小,能够在获得高功率输出的同时保证高光束质量。

自 1994 年 Giesen 等<sup>[12]</sup>提出薄片激光器的概念以来,国内外研究人员对此开展了大量研究。薄片增益介质的常见泵浦方式是端面泵浦和侧面泵浦。在单通端面泵浦方式下,薄片增益介质中的泵浦光吸收长度仅是薄片厚度的二倍。为了增加吸收长度、保证泵浦光被薄片增益介质充分吸收,泵浦方式发展为复杂的多通泵浦<sup>[13]</sup>,将泵浦吸收长度提高至薄片厚度的 16 倍甚至更高。侧面泵浦方式是直接将泵浦光从薄片增益介质的侧面输入,与单通端面泵浦方式相比,侧面泵浦方式为泵浦光提供了一个较长的吸收长度。2002 年研究人员提出了侧面泵浦键合薄片的结构<sup>[14]</sup>,泵浦光从薄片晶体侧面入射晶体,提高了泵浦光的吸收

效率。

在激光材料方面,Yb:YAG 是常用的薄片增益介质,其量子效率高,热效应小,可以高掺杂。2000 年以来,研究人员报道了边缘泵浦键合 Yb:YAG 薄片结构激光器<sup>[15-18]</sup>,在键合晶体侧面或斜角开若干个窗口作为泵浦光入射面,通过端面镀有的高反膜,抽运光在晶体中沿“Z”形传播,多次经过增益介质,储能呈近高斯分布。但 Yb:YAG 晶体为准三能级结构,发射截面小,阈值泵浦功率密度高。另一种常用的激光增益介质 Nd:YAG 为四能级结构,发射截面大,阈值泵浦功率密度低,该类介质的薄片结构也得到了相关研究。2004 年,柳强等<sup>[19]</sup>通过边缘抽运六角形薄片,在轴向 -0.4~0.4 mm 范围内实现了泵浦光功率均匀分布。2011 年,李强课题组验证了可通过增大介质薄片的面积,增加通光口径,进而降低晶体单位面积内的热耗散功率密度,进一步发挥了薄片激光器的潜力<sup>[20]</sup>。

本文研究了大功率激光二极管叠阵侧面折返泵浦多边形 Nd:YAG 增益介质的热效应,采用适当增加 Nd:YAG 薄片介质厚度、优化耦合系统的方法,提高了泵浦效率和介质内泵浦光吸收功率分布的均匀性。在综合考虑薄片轴向及径向吸收功率分布的情况下,通过光线追迹和有限元数值模拟的方法,分别计算了侧面切角为 90°和 45°的两种多边形薄片增益介质在侧面泵浦方式下的泵浦光吸收功率分布和温度分布。通过实验验证了 45°切割的侧面折返泵浦的多边形薄片增益介质有利于实现储能的近平顶分布,并可有效

收稿日期: 2022-01-07; 修回日期: 2022-02-14; 录用日期: 2022-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(6187030118)

通信作者: \*keith0311@163.com

降低晶体热效应。

## 2 侧面泵浦多边形薄片增益介质构型

侧面泵浦多边形薄片增益介质结构如图 1 所示,增益介质是掺杂浓度(原子数分数)为 0.3% 的端面为正五边形的 Nd:YAG 晶体。如图 1(b)所示,薄片前端面内切圆直径为 16 mm,厚度为 1.5 mm,晶体侧面与端面呈一定切角(文中为 45°或 90°)。5 个激光二极管面阵在晶体周围对称排列,泵浦光通过缩束耦合结构,垂直于晶体侧面入射。泵浦光在介质内部通过全反射沿折返光路传输,多个方向入射的泵浦光在介质中心交叠成一近似圆形区域。如图 1(c)所示,晶体吸收泵浦光后产生的热量由后端面传导至热交换器,热交换器在实现均匀冷却的同时提供了一个刚性衬底,以保证薄片介质位置稳定。

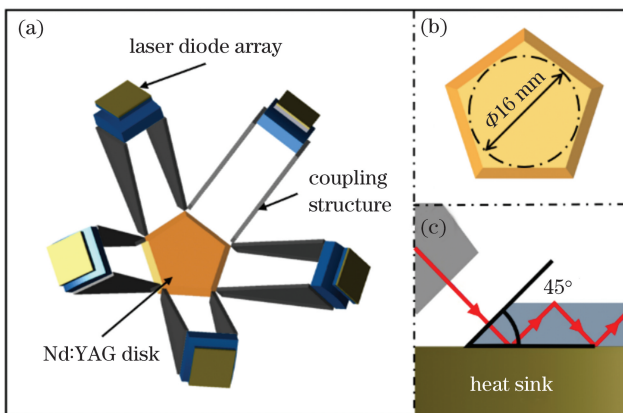


图 1 侧面泵浦多边形薄片增益介质示意图。(a)泵浦结构; (b)晶体结构;(c)泵浦光传输路径

Fig. 1 Schematics of side-pumped polygonal thin-disk gain medium. (a) Pumping structure; (b) crystal structure; (c) transmission path of pump light

单个激光二极管面阵包含多个巴条,单个巴条的输出峰值功率为 300 W,快轴发散角约为 35°,慢轴发散角约为 8°,发光区域尺寸约为 10 mm×10 mm。由于激光二极管的快轴发散角较大,可先利用快轴准直器(fast axis collimator, FAC)压缩快轴发散角,准直后的快轴发散角≤0.5°。经过 FAC 阵列准直后的泵浦光束尺寸仍较大,需要将其缩束,使其与增益介质泵浦面尺寸匹配。如图 2 所示,泵浦耦合结构由柱面镜和反光镜组成,这种组合设计的优点是将泵浦光在快、慢轴方向分别进行整形和约束。经过仿真设计,泵浦光经耦合结构到达泵浦面时沿快轴方向的强度分布呈近高斯型,光斑尺寸约为 12.6 mm×1.4 mm,而多边形增益介质的 45°斜侧面是上底边长为 11.62 mm、下底边长为 13.8 mm、高为 2.12 mm 的梯形,泵浦光斑对晶体侧面的覆盖率约为 65%。经计算分析,整形耦合系统引入的泵浦光损耗不大于 3%。

因此,考虑到整形镜组的光学损耗以及缩束泵浦光斑与晶体侧面的匹配,本文设计的缩束耦合结构能

够有效保证传输效率大于 97%。

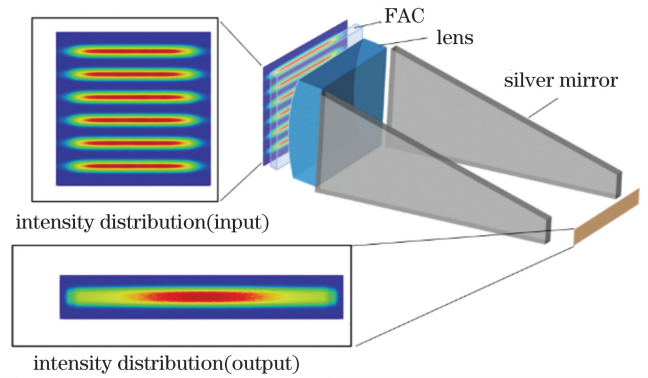


图 2 缩束耦合结构的三维图及缩束前后二维泵浦光强的分布

Fig. 2 3D diagram of beam-shrinking coupling structure and two-dimensional pump light intensity distributions before and after beam shrinking

## 3 数值计算

薄片增益介质在将吸收的泵浦光转化成储能的同时产生废热,不均匀的泵浦光吸收功率分布会造成不均匀的热分布,导致热透镜和热致应力双折射效应,降低光束质量。因此提升薄片介质内泵浦光吸收功率分布的均匀性有助于提升输出光的光束质量。

增益介质各处的掺杂浓度相同,按吸收定律<sup>[21]</sup>,在泵浦光的传输方向上增益介质对其呈指数函数式吸收。为了提升泵浦光吸收功率在径向上的分布均匀性,本文采用多个激光二极管阵列对称分布于薄片介质四周进行泵浦,利用各泵浦光之间的对称性,在晶体中实现泵浦光吸收功率的近平顶分布。

此外,对于具有一定厚度的薄片增益介质,轴向上泵浦光吸收功率的分布也会影响介质的热分布。如图 3(a)所示,在 90°切割的晶体中,泵浦光沿直线传播,因此轴向上的泵浦光吸收功率呈近高斯分布。如图 3(b)所示,对于侧面切角 45°的增益介质,泵浦光垂直侧面入射,利用介质端面进行全内反射,泵浦光在晶体中沿折返光路传输,可实现轴向上的泵浦光均匀吸收。

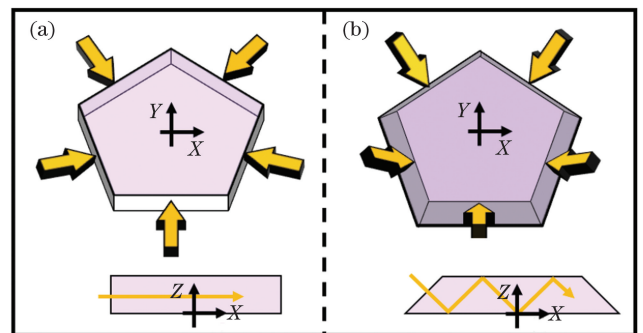


图 3 不同介质切角下的侧面泵浦示意图。(a) 90°;(b) 45°

Fig. 3 Schematics of side pumping at different medium cutting angles. (a) 90° ;(b) 45°

### 3.1 泵浦光吸收通量分布

为了引入轴向泵浦光,将增益介质网格划分为若干体元,并将增益介质内各体元的吸收通量( $F$ )以图 4 所示的三维矩阵形式表示,图 4 中 width 方向和

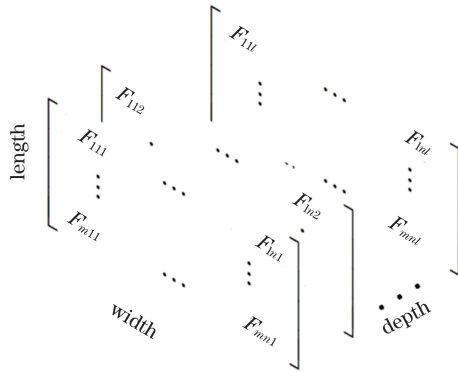


图 4 增益介质内体元吸收通量的分布矩阵

Fig. 4 Distribution matrix of volume element absorbed flux in gain medium

length 方向分别对应晶体径向  $X$  和  $Y$  方向(图 3), depth 方向对应晶体厚度  $Z$  方向,  $m$ 、 $n$  和  $l$  分别为  $X$  方向、 $Y$  方向和厚度方向的晶体体元数。基于 Zemax 光学设计软件建模计算得到的泵浦光吸收强度分布如图 5、6 所示。

图 5(a)为  $90^\circ$  切割的增益介质内不同截面上的泵浦光通量二维分布,图 5(b)为  $45^\circ$  切割的增益介质内不同截面上的泵浦光通量二维分布。由于泵浦光具有旋转对称性,增益介质内径向和轴向上的泵浦光吸收通量分布曲线包含了泵浦光通量的分布规律,如图 6(a)、(b)所示。侧面切角为  $90^\circ$  时,增益介质内泵浦光在径向上的吸收通量分布呈近平顶分布,在轴向上的吸收通量分布呈近似高斯分布,泵浦光的吸收通量主要集中于薄片厚度方向的中间部分,这将导致增益介质内部温度分布不均匀。侧面切角为  $45^\circ$  时,泵浦光的吸收通量在径向和轴向上均呈近平顶分布,晶体内部产热均匀。

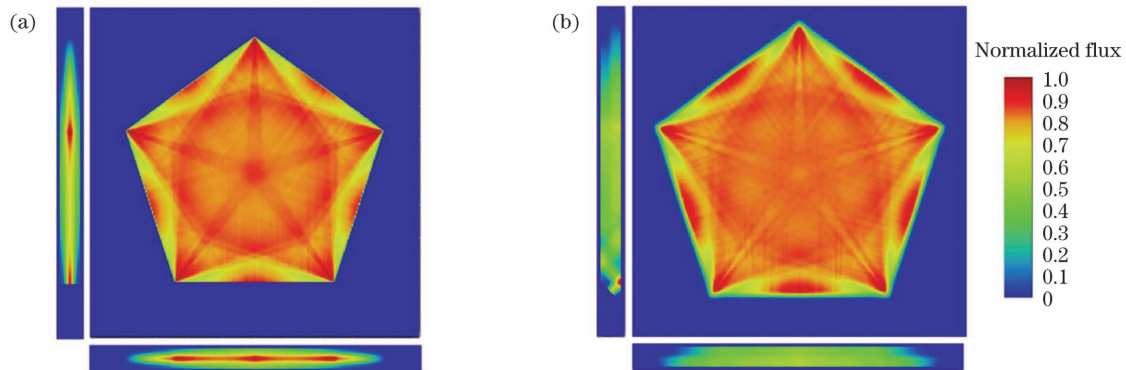


图 5 不同切角增益介质内不同截面上泵浦光的归一化通量的二维分布图。(a) $90^\circ$ ;(b) $45^\circ$

Fig. 5 Two-dimensional normalized flux distributions of pump light on different sections in gain media with different cutting angles. (a)  $90^\circ$ ; (b)  $45^\circ$

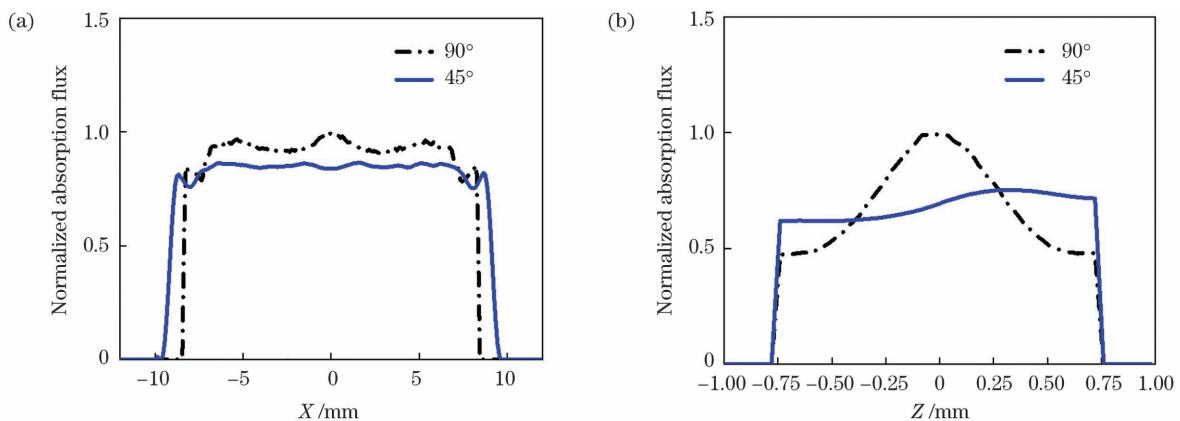


图 6 不同切角增益介质内泵浦光的吸收通量分布曲线。(a)径向;(b)轴向

Fig. 6 Absorption flux distribution curves of pump light in gain media with different cutting angles. (a) Radial; (b) axial

### 3.2 多边形薄片增益介质的温度分布模拟

薄片增益介质的模型如下:五边形薄片介质为 Nd:YAG 晶体,侧面为泵浦面,前端面为激光通光面,后端面为激光反射面和冷却面,即单面传导冷却,热沉为铜材质的微水道圆柱体结构。通过有限

元算法求解热传导方程,可以计算薄片增益介质的温度分布。

本文所提及的多边形薄片增益介质及泵浦源参数如表 1 所示。Nd:YAG 材料的热力学参数如表 2 所示。



表 1 多边形薄片增益介质及泵浦源参数  
Table 1 Parameters of polygon thin-disk gain medium and pump source

Parameter	Unit	Value
Pump wavelength	nm	808
Pump pulse width	$\mu\text{s}$	250
Pump frequency	Hz	100
Peak power of single array	W	1800
Crystal doping concentration (atomic fraction)	-	0.3%
Absorption coefficient	$\text{cm}^{-1}$	1.4
Heat sink diameter	mm	30
Heat sink thickness	mm	10
Circulating water temperature	$^{\circ}\text{C}$	25
Ambient temperature	$^{\circ}\text{C}$	23

表 2 Nd:YAG 热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters of Nd:YAG

Parameter	Unit	Value
Refractive index( $n_d$ )	-	1.82
Thermo-optic coefficient ( $\partial n / \partial T$ )	$\text{K}^{-1}$	$7.3 \times 10^{-6}$
Thermal expansion coefficient	$\text{K}^{-1}$	$7.5 \times 10^{-6}$
Rupture stress	$\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$	$1.3 \times 10^6 - 2.6 \times 10^6$
Thermal conductivity	$\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.14
Density	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	4.56
Young's modulus	$\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$	$3 \times 10^6$
Poisson's ratio	-	0.28
Stokes efficiency	-	76%
Specific heat capacity	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	590

体元上的吸收通量  $F$  为光源通过该体元时轨迹长度下的吸收功率,因此增益介质吸收泵浦光的总功率( $P_{\text{abs}}$ )可表示为

$$P_{\text{abs}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l F_{ijk}, \quad (1)$$

式中: $i, j$  和  $k$  分别为  $X, Y$  和  $Z$  方向的体元序号; $F_{ijk}$  为吸收通量。

薄片介质吸收泵浦光后产生热量,介质内的热功率( $P_h$ )可表示为

$$P_h = \eta_h \cdot P_{\text{abs}}, \quad (2)$$

式中: $\eta_h$  为热转换系数,代表吸收泵浦光功率转化成热功率的比例,与斯托克斯效率( $\eta_{\text{Stokes}}$ )有关,可表示为

$$\eta_h = 1 - \eta_{\text{Stokes}} \approx 0.24. \quad (3)$$

考虑泵浦光的吸收通量分布,薄片晶体内的热沉积分布可表示为

$$Q_{ijk} = F_{ijk} \cdot \eta_h = F_{ijk} \cdot (1 - \eta_{\text{Stokes}}). \quad (4)$$

增益介质内部温度的热传导方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k' \nabla T) = Q, \quad (5)$$

式中: $T$  为温度; $k'$  为介质热导率; $\rho$  为增益介质的密度; $C_p$  为比热容; $t$  为时间; $Q$  为热源。在稳态情况下,温度不随时间变化,第一项可以省略。

边界条件应满足

$$-k'(\nabla T) \cdot \mathbf{n} + h(T - T_{\text{ref}}) = 0, \quad (6)$$

式中: $h$  为边界面与环境的换热系数; $\mathbf{n}$  为介质表面外法线向量; $T_{\text{ref}}$  为介质表面温度。在热分析中,综合考虑增益介质前端面和侧面的空气自然对流冷却以及后端面的热沉传导冷却。通过热分析软件建立多边形薄片增益介质的三维有限元分析模型。

当泵浦光平均功率为 165 W,即峰值功率为 6.6 kW 时,计算得到的多边形薄片增益介质的表面温度分布如图 7、8 所示。当系统达到热平衡时,相比于侧面切角为  $90^{\circ}$  的增益介质,侧面切角为  $45^{\circ}$  的增益介质在径向上的整体温度降低近  $5^{\circ}\text{C}$ ,且薄片晶体前端面与后端面的温差降低约  $2^{\circ}\text{C}$ 。当泵浦功率进一步提升时,温差将进一步加大。轴向温差在不同泵浦方式下的差异较大,侧面切角为  $90^{\circ}$  时,薄片晶体前端面温度与后端面温度相差近  $12^{\circ}\text{C}$ 。侧面切角为  $45^{\circ}$  时,薄片晶体前端面温度与后端面温度相差  $9^{\circ}\text{C}$ ,在温度整体降低  $4^{\circ}\text{C}$  时,温差也降低  $2^{\circ}\text{C}$ 。随着泵浦功率的增加和薄片厚度的加大,该温度差值将进一步增大。该计算结果表明,轴向储能的均匀分布有利于降低增益介质的整体温度和内部温差,进而降低增益介质的热效应。

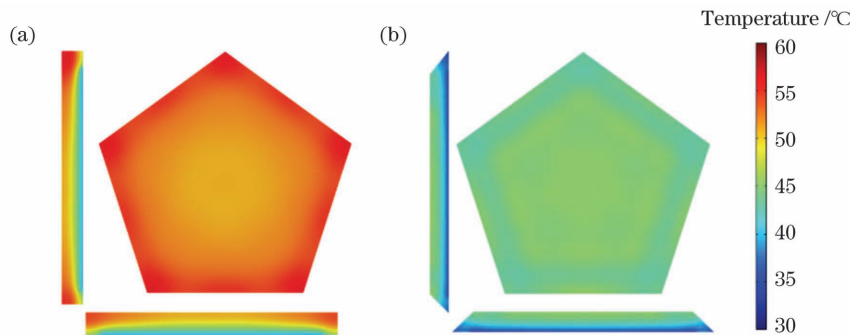


图 7 不同切角增益介质前端面和轴向的温度分布二维图。(a) $90^{\circ}$ ;(b) $45^{\circ}$

Fig. 7 2D diagrams of temperature distributions in front face and axial direction of gain media with different cutting angles.

(a)  $90^{\circ}$ ; (b)  $45^{\circ}$

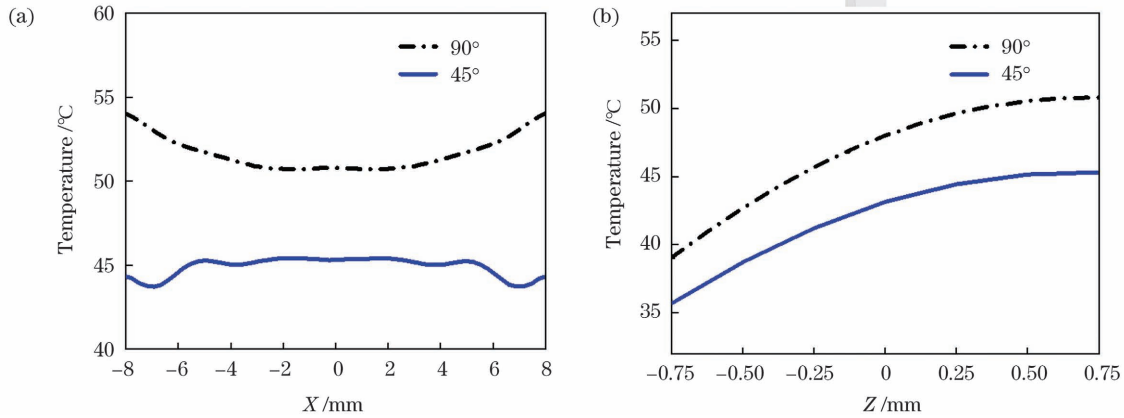


图 8 不同切角多边形增益介质表面的温度分布。(a)径向;(b)轴向

Fig. 8 Surface temperature distributions of polygonal gain media with different cutting angles . (a) Radial; (b) axial

## 4 实验结果

### 4.1 荧光分布

增益介质吸收泵浦光后,通过自发辐射产生荧光,荧光强度的分布可以反映泵浦光的吸收通量分布,也代表了介质的增益分布。五边形 Nd:YAG 薄片增益介质的厚度为 1.5 mm,前端面内切圆直径为 16 mm,掺杂浓度(原子数分数)为 0.3%。实验采用相机成像的方式获得增益介质的荧光分布。

图 9(a)为数值计算得到的增益介质内的泵浦光吸收通量分布三维图,分布均匀性的均方根(RMS)为

3.12%。实验测得的增益介质的荧光分布如图 9(b)所示,在直径为 16 mm 的范围内,分布均匀性 RMS 为 2.52%。实验结果与理论计算结果吻合较好。增益平顶分布可以有效抑制畸点的出现,保证良好的光束质量,提升激光输出功率并避免光学元件损伤。部分荧光由于全内反射,在晶体内折返传输,晶体顶点处的加工倒角使这部分荧光从顶点处折射,在 CCD 中观察到顶点处出现亮点。值得注意的是,在实际应用中,用于激光放大的区域为晶体前端面内接圆(直径为 16 mm),顶点在激光放大区域以外,不影响激光放大效果。

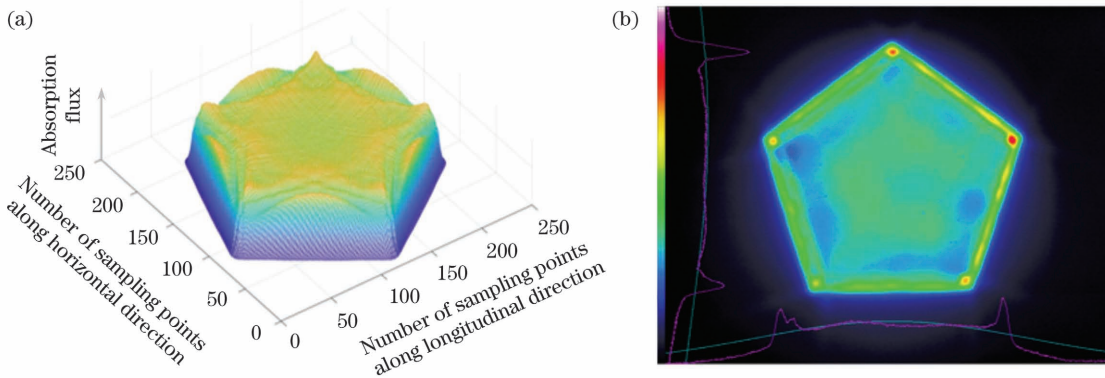


图 9 泵浦光的吸收通量分布。(a)仿真结果;(b)荧光分布的测量结果

Fig. 9 Absorption flux distributions of pump light. (a) Simulation result; (b) measurement result of fluorescence distribution

### 4.2 温度分布

增益介质吸收泵浦光后通过无辐射跃迁产生热量,与散热方式一起共同影响温度分布。通过热像仪观察多边形增益介质表面温度分布,如图 10 所示,介质侧面与后端面交界处的温度较高,约为 75 °C。这是由于缩束耦合结构的机械调节精度较低,部分泵浦光照在热沉上,出现温升。此外,图 10 中的最高温度是缩束耦合系统中未被晶体完全吸收的泵浦光照射在反光镜基底上导致的。增益介质整体的温度分布较为均匀,中心内接圆范围内的温度为 46~52 °C,与仿真结果(图 7)吻合。均匀的温度分布可以降低增益介质的热效应,减小波前畸变,保证激光光束质量,有利于后续的激光放大;另一方面,均匀的温度分布能够避免晶

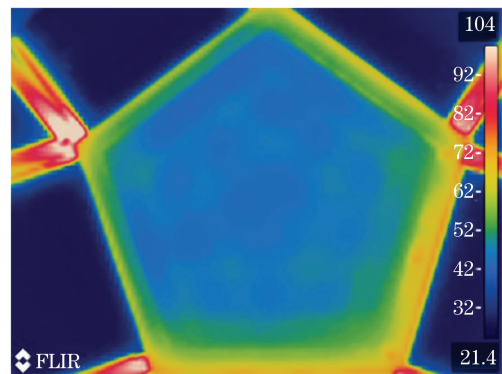


图 10 实验测得的晶体表面温度(单位: °C)

Fig. 10 Experimentally measured surface temperature of crystal (unit: °C)

体中出现应力损伤。

### 4.3 热致波前畸变

增益介质的温度分布导致热致光程差,从而改变激光波前。以连续氦氖激光器作为测试光源,利用透镜组准直扩束后,探测光斑是直径近 16 mm 的圆形,光斑经过增益介质反射后,利用波前传感器测量热致波前畸变。图 11 为不同泵浦功率下增益介质热致波前畸变的峰-谷值和 RMS 值,当平均泵浦功率为 165 W 时, Nd:YAG 薄片增益介质的热致波前畸变 RMS 值约为  $0.14\lambda$ , 其中  $\lambda$  为测试光波长。

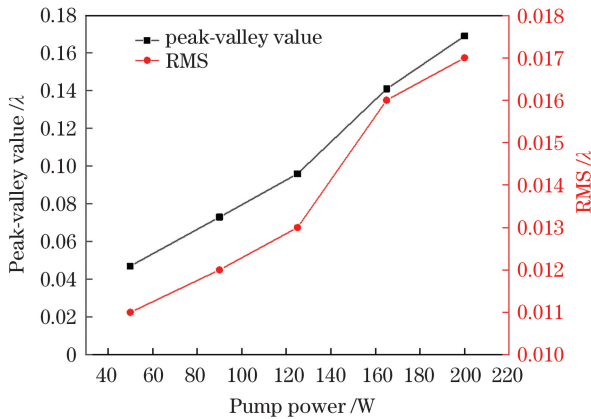


图 11 实验测得的增益介质热致波前畸变的峰-谷值和 RMS 值

Fig. 11 Experimentally measured peak-valley values and RMS values of thermal wavefront distortion of gain medium

### 4.4 激光振荡器输出

图 12 显示了薄片增益介质在短腔中的输出功率与泵浦功率的关系。随着泵浦功率的增加,输出功率呈近线性增加,输出镜透过率为  $T=3\%$ 。当泵浦功率为 220 W 时,最大输出功率为 85.4 W,斜率效率为 40.1%。当泵浦功率为 220 W 时,输出功率仍保持较好的线性增加,证明了该侧面切角  $45^\circ$  多边形薄片构型能够有效降低增益介质的热效应,在较高的泵浦功率下仍保持较高的激光输出斜率效率。激光光束的光强分布如图 13 所示,激光光强呈近平顶分布,稳腔下

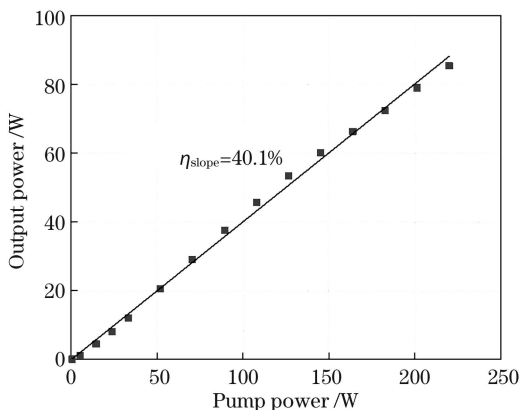


图 12 实验测得的激光振荡器的斜率效率

Fig. 12 Experimentally measured slope efficiency of laser oscillator

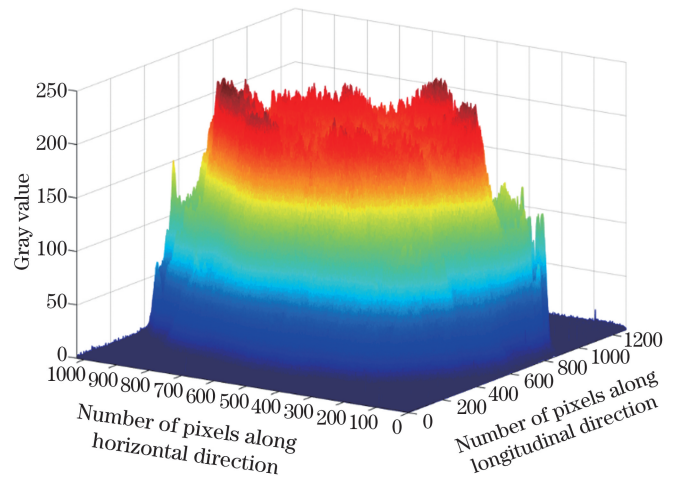


图 13 振荡器输出激光的光束强度三维分布图

Fig. 13 3D distribution of beam intensity of oscillator output laser

测得的激光衍射极限倍数( $\beta$ )约为 10。在激光系统中,为了在远场获得较高的功率密度,需要光束具有较高功率和较高的功率集中度,即激光束聚焦在远场目标上的光斑要尽量小。 $\beta$  因子能够合理评价实际激光束的传输效率和聚焦能力,可通过焦斑半径<sup>[22]</sup>来定义:

$$\beta = \omega / \omega_0, \quad (7)$$

式中: $\omega$  和  $\omega_0$  分别为测试光束和理想光束经过同一聚焦系统后的焦斑半径。测试时,理想光束是与待测光束具有相同口径的基模高斯光,通过计算得到理想光束的焦斑半径。测试光束的焦斑半径通过 CCD 实验测量。

## 5 结 论

对二极管叠阵侧面折返泵浦的多边形 Nd:YAG 薄片增益介质进行了数值模拟和实验研究。通过理论数值模拟,对比了增益介质在侧面切角  $90^\circ$  和侧面切角  $45^\circ$  两种情况下的泵浦光吸收通量分布和温度分布。实验结果表明:侧面折返泵浦方式下晶体内切圆范围内的荧光分布均匀性 RMS 优于 3%;当泵浦光平均功率为 165 W 时,增益介质前端面内切圆内的最大温差约为  $6^\circ\text{C}$ ,晶体的热致波前畸变为  $0.14\lambda$ 。研究结果证明了侧面折返泵浦多边形薄片增益介质能够实现晶体内储能的近平顶分布,提高了储能分布的均匀性,从而减小了晶体内的热梯度,降低了热致波前畸变,有利于全固态激光器在提高输出功率的同时保证较好的光束质量。

### 参 考 文 献

- [1] Yasuhara R, Kawashima T, Sekine T, et al. 213 W average power of 2.4 GW pulsed thermally controlled Nd: glass zigzag slab laser with a stimulated Brillouin scattering mirror [J]. Optics Letters, 2008, 33(15): 1711-1713.
- [2] Coyle D B, Stysley P R, Poulos D, et al. High efficiency, 100 mJ per pulse, Nd:YAG oscillator optimized for space-based



- earth and planetary remote sensing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 13-18.
- [3] 付星, 刘廷昊, 雷新星, 等. 二极管泵浦重复频率纳秒高能固体激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1501003.  
Fu X, Liu T H, Lei X X, et al. High energy diode-pumped rep-rated nanosecond solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1501003.
- [4] Fan Z W, Qiu J S, Kang Z J, et al. High beam quality 5 J, 200 Hz Nd : YAG laser system [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(3): e17004.
- [5] 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): 1201004.  
Yi J Y, Tu B, Cao H X, 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.
- [6] 蒋琳, 刘军, 袁晓蓉, 等. 薄片激光器低畸变冷却技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(3): 0301001.  
Jiang L, Liu J, Yuan X R, et al. Cooling techniques for deformation reduction of thin-disk lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(3): 0301001.
- [7] 杨火木, 冯国英, 魏泳涛, 等. 基于热-流-固多物理场耦合的薄片激光器温度场研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0902004.  
Yang H M, Feng G Y, Wei Y T, et al. Study on temperature distribution of disk-type laser based on heat-fluid-solid Multiphysics coupling method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0902004.
- [8] Lavi R, Jackel S, Tal A, et al. 885 nm high-power diodes end-pumped Nd:YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2001, 195 (5/6): 427-430.
- [9] Goldring S, Lavi R. Nd:YAG laser pumped at 946 nm [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(7): 669-671.
- [10] Deng W P, Yang T, Cao J P, et al. High-efficiency 1064 nm nonplanar ring oscillator Nd:YAG laser with diode pumping at 885 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1562-1565.
- [11] Eggleston J M, Frantz L M, Injeyan H. Deviation of the Frantz-Nodvik equation for zig-zag optical path, slab geometry laser amplifiers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25 (8): 1855-1862.
- [12] 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.
- [13] Stewen C, Contag K, Larionov M, et al. A 1-kW CW thin disc laser [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(4): 650-657.
- [14] Vetrovec J. Ultrahigh-average-power solid state laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4760: 491-505.
- [15] 柳强, 巩马理, 潘圆圆, 等. 边缘抽运复合 Yb:YAG/YAG 薄片激光器设计与功率扩展[J]. *物理学报*, 2004, 53(7): 2159-2164.  
Liu Q, Gong M L, Pan Y Y, et al. Edge-pumped composite thin-disc Yb:YAG/YAG laser: design and power scaling [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(7): 2159-2164.
- [16] Liu Q, Fu X, Ma D, et al. Edge-pumped asymmetric Yb:YAG/YAG thin disk laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(10): 719-721.
- [17] Aminpour H, Pflaum C. Optical path difference of slanted edge diode-pumped Yb:YAG/YAG thin-disk laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8959: 308-316.
- [18] Grigore O V, Croitoru G, Dascalu T, et al. Diode-laser edge-pumped Nd:YAG/YAG lens-shaped composite laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 94: 86-89.
- [19] 柳强, 巩马理, 闫平, 等. 边缘抽运薄片 Nd:YAG 激光器 [J]. *中国激光*, 2004, 31(s1): 35-37.  
Liu Q, Gong M L, Yan P, et al. Edge-pumped thin-disc Nd:YAG lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(s1): 35-37.
- [20] 冯驰, 郭晋荣, 李强. 大尺寸 Nd:YAG 侧面泵浦薄片激光器热效应实验研究 [J]. *应用激光*, 2011, 31(5): 414-417.  
Feng C, Guo W R, Li Q. Experimental study of thermal effect on large size Nd:YAG side pumped thin disk laser [J]. *Applied Laser*, 2011, 31(5): 414-417.
- [21] Koechner W. *Solid-State Laser Engineering* [M]. New York: Springer, 2006.
- [22] 冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨 [J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1643-1653.  
Feng G Y, Zhou S H. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36 (7): 1643-1653.

## Thermal Effect of Side-Zigzag-Pumped Polygonal Nd:YAG Thin Disk

Chen Qiao<sup>1,2</sup>, Ge Wenqi<sup>1,2</sup>, Bian Shengwei<sup>3</sup>, Wang Tianqi<sup>1</sup>, Qiu Jisi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> *Optical Engineering Research Department, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

<sup>2</sup> *School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

<sup>3</sup> *Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, The 11th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China*

### Abstract

**Objective** Solid-state lasers are extensively employed in industrial processing, medical treatment, scientific research, etc. Recently, with the maturity of semiconductor laser devices, solid-state lasers pumped by semiconductor lasers are developing towards higher power and higher beam quality, which is applied to more scenes. However, when the pump power increases, more heat accumulates in the gain medium, resulting in more serious thermal impacts, which will affect the further enhancement of beam quality and laser power. To reduce the thermal effect, different designs, including cryogenically cooled gain medium, direct pumping approaches, and thin disks, are employed. Compared with traditional gain medium configurations including rods and slabs, the thin-disk gain medium has a minimal temperature gradient in the axial direction, which can obtain a high-power laser output with high beam quality. The finite element numerical simulation and experimental tests are carried out to further understand the beam quality degradation and output power

limitation caused by thermal effect in the laser diode array side-pumped Nd:YAG disk. The axial and radial distributions of pump light absorption flux and temperature in the polygon disks with  $90^\circ$  and  $45^\circ$  cutting angles are examined and compared.

**Methods** The side-pumped pentagon thin disk gain medium discussed in this study is an Nd:YAG crystal with a doping concentration (atomic fraction) of 0.3%, and a thickness of 1.5 mm. Five laser diode arrays are symmetrically positioned around the disk, and the pump light is vertically incident on the crystal side through the pump coupling structure. In the pump coupling structure, the fast-axis collimator is employed to control the transmission direction of the fast-axis beam to be nearly parallel, and the coupling structure consisted of the cylindrical lens and reflectors is used to compress the large-area pump light to match the thin disk size. Experiments reveal that the pump light coupling efficiency is 97%. The pump light is transmitted along a zig-zag path through total internal reflection inside the medium, and the pump light is incident from numerous directions overlapping into an approximately circular area in the crystal. The absorption flux distribution of the pump light in the gain medium is nearly flat-topped in the radial direction and approximately Gaussian in the axial direction when the cutting angle of thin disk is  $90^\circ$ . The absorption flux of the pump light is primarily concentrated in the middle of the disk along the thickness direction, resulting in uneven temperature gain of the medium. When the cutting angle of thin disk is  $45^\circ$ , the absorption flux distribution of the pump light is nearly flat-topped in the radial and axial directions, and the heat generation inside the crystal is uniform. A three-dimensional finite element analysis model of a polygonal thin-disk gain medium is created using thermal analysis software. When the average pump power is 165 W, compared to the gain medium with a cutting angle of  $90^\circ$ , the overall radial temperature of the gain medium with a cutting angle of  $45^\circ$  decreases by approximately  $5^\circ\text{C}$ , and the temperature difference decreases by about  $2^\circ\text{C}$ . The temperature difference increases with an increase in pumping power. Under various cutting angles, the axial temperature difference is larger. When the cutting angle is  $90^\circ$ , the temperature difference between the front-end and back-end surfaces of the thin crystal is about  $12^\circ\text{C}$ . When the cutting angle is  $45^\circ$ , the temperature difference between the two ends of the thin disk crystal is  $9^\circ\text{C}$ .

**Results and Discussions** Experimental findings reveal that the fluorescence distribution (Fig. 9), temperature distribution (Fig. 10) and wavefront aberration (Fig. 11) in the gain medium are consistent with theoretical analysis results. The root mean square (RMS) of uniformity of fluorescence distribution in the range with 16 mm diameter is 2.52%. The gain medium's over-temperature distribution is relatively uniform, and the temperature in the inscribed circle of the center is  $46\text{--}52^\circ\text{C}$ . When the pumping power is 165 W, the thermal-induced wavefront distortion of the Nd:YAG thin disk gain medium is about  $0.14\lambda$ . Here  $\lambda$  is the test wavelength. Under 220 W pump power, 85 W output power is obtained from the polygonal Nd:YAG thin-disk laser, with a slope efficiency of 40.1% and beam quality  $\beta \approx 10$  (Fig. 12).

**Conclusions** In this study, numerical simulations and experiments are conducted on a polygonal Nd:YAG thin-disk gain medium pumped by diode lasers. Experimental findings show that a side-zigzag-pumped polygonal thin disk with  $45^\circ$  cutting angle can achieve a flat-top distribution of energy storage and further reduce the gain medium thermal effect. The thermal effect's reduction in the gain medium is conducive to enhancing the output power of the solid-state laser while maintaining better beam quality.

**Key words** lasers; thin disk gain medium; side pump; zig-zag pump; thermal effect