

二极管叠阵侧面折返泵浦多边形薄片激光器

陈巧 邱基斯 张旭 葛文琦 刘悦亮 刘昊 王昊成

Laser-diode-array side-zigzag-pumped polygon thin-disk laser

Chen Qiao Qiu Ji-Si Zhang Xu Ge Wen-Qi Liu Yue-Liang Liu Hao Wang Hao-Cheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 164202 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210287

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210287>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

波长锁定激光二极管共振泵浦Nd:YVO₄晶体连续波自拉曼激光器的设计与研究

Research and design of continuous-wave Nd:YVO₄ self-Raman laser in-band pumped by a wavelength-locked laser diode

物理学报. 2017, 66(19): 194203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.194203>

外部光注入的光泵浦自旋垂直腔表面发射激光器中的两个混沌偏振分量对两个复杂形状目标中的多区域精确测距

Precise ranging for the multi regions of two complex-shape targets by using two chaotic polarization components in the optically pumped spin vertical cavity surface emitting laser with optical injection

物理学报. 2021, 70(7): 074206 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201693>

数值模拟抽运分布对端泵激光器晶体热透镜球差的影响

Numerical simulation of effect of pump distribution on spherical aberration of end-pumped laser

物理学报. 2018, 67(17): 174204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180113>

基于微透镜阵列匀束的激光二极管面阵抽运耦合系统分析

Analysis of laser diode array pump coupling system based on microlens array

物理学报. 2018, 67(18): 184201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172473>

波长锁定878.9 nm激光二极管抽运内腔式YVO₄/BaWO₄连续波拉曼激光器

Continuous-wave intracavity YVO₄/BaWO₄ Raman laser pumped by a wavelength-locked 878.9 nm laser diode

物理学报. 2018, 67(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171848>

双波长二极管合束端面抽运掺镨氟化铈锂单纵模360 nm紫外激光器

Combined dual-wavelength laser diode beam end-pumped single longitudinal mode Pr³⁺:LiYF₄ 360 nm ultraviolet laser

物理学报. 2019, 68(5): 054202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182018>

二极管叠阵侧面折返泵浦多边形薄片激光器*

陈巧¹⁾²⁾ 邱基斯^{1)†} 张旭³⁾⁴⁾ 葛文琦¹⁾ 刘悦亮¹⁾ 刘昊¹⁾ 王昊成¹⁾

1) (中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

2) (中国科学院大学光电学院, 北京 100049)

3) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

4) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

(2021年2月7日收到; 2021年4月13日收到修改稿)

本文报导了一种二极管叠阵侧面折返泵浦的多边形薄片 Nd:YAG 激光器, 通过对其增益特性和光学特性的优化, 得到了泵浦光耦合效率为 97%, 增益介质吸收效率达 87%, 增益介质内泵浦吸收分布均匀性为 3.21% (root mean square, RMS) 的结果. 实验测得与模拟数据吻合较好的增益介质荧光分布. 在泵浦能量为 2.2 J 时, 获得了能量 0.85 J 的激光输出, 光-光效率达 38.8%, 斜效率为 40.1%. 在 1 Hz~100 Hz 的频率范围内输出能量保持稳定, 在重复频率 1 Hz 时测得单脉冲能量稳定性为 2.7%(RMS), 在稳腔下测得激光衍射极限倍数 β 约为 10.

关键词: 薄片激光器, 侧面泵浦, 泵浦均匀性

PACS: 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.By, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.70.20210287

1 引言

高平均功率全固态激光器是当前国际激光技术领域的主要研究方向之一, 在空间探测、国防、精密加工等领域有重大应用^[1]. 高平均功率固体激光器中的热效应问题主要是由增益介质泵浦过程引起的^[2]. 传统棒状、板条结构固体激光器的热管理性能较差, 导致热沉积, 进而产生热透镜效应、热致双折射和热应力损伤, 这些热效应造成了激光的波前畸变, 影响了激光的光束质量, 限制了激光功率的进一步提升^[3,4]. 1994年, 德国航空航天研究院技术物理所的研究人员 Giesen 等^[5]提出薄片激光器概念, 薄片作为一种大口径/厚度比的增益介质构型, 能够减小高泵浦功率产生的热沉积, 大大减弱温度梯度带来的波前畸变, 实现较好的激光

光束质量^[6,7].

2004年德国 Trumpf-Laser 公司^[8]采用多通耦合结构泵浦单个 Yb:YAG 薄片, 获得 5.3 kW 的连续激光输出, 光-光效率达到 65%. 2009年美国 Boeing 公司^[9]报道了 10 个 Yb:YAG 薄片串接的激光器, 实现了超过 25 kW 的连续输出, 斜效率接近 70%, 这是有报道的最大功率的薄片激光器. 2013年, 清华大学柳强教授课题组^[10]研制了大口径 (50 mm × 30 mm × 5 mm) Nd:YAG 薄片激光器, 该薄片激光器采用端面泵浦的方式, 实现峰值功率为 1346 W 的激光输出, 激光的近场均匀. 2016年, 德国 Stuttgart 大学报道了采用端面多通泵浦薄片介质的方式, 在泵浦功率为 1.7 kW 时, 得到了 635 W 的激光输出, 单脉冲能量为 2.1 mJ, 光束质量 M^2 为 2.3^[11]. 2017年中国工程物理研究院^[12]报道了大口径 (ϕ 60 mm × 2 mm) 高质量 Nd:

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB0407400, 2018YFB0407402) 和国家自然科学基金 (批准号: 6187030118) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: keith0311@163.com

YAG 透明陶瓷薄片激光器, 激光器在重频 500 Hz 时最大输出功率为 2052 W.

从以上国内外研究现状可以看出, 增益介质选用薄片结构是减小热效应、提高光束质量的有效途径之一. 国外薄片激光器的增益介质材料多采用 Yb:YAG, 因其具有高量子效率和低热效应的优势. 但 Yb:YAG 晶体阈值高、增益小、自吸收效应严重, 为保证泵浦光被薄片介质完全吸收, 通常需要采用非常复杂的多通耦合结构或键合结构来增加泵浦吸收路径^[13]. 本文采用 Nd:YAG 薄片作为激光增益介质, 通过侧面折返泵浦的方式降低泵浦耦合结构的系统复杂度^[14].

薄片激光器常见的泵浦方式为端面泵浦和侧面泵浦两种^[15], 与端面泵浦方式相比, 侧面泵浦方式为泵浦光提供了一个较长的吸收路径^[16], 可降低晶体的掺杂浓度, 在一定程度上可解决大吸收截面晶体自淬灭效应的影响. 日本 Dascalu 等^[17]、清华大学柳强课题组^[18,19]、伊斯兰自由大学^[20]等报道了侧面边缘泵浦复合薄片结构的激光器, 掺杂的 Yb:YAG 晶体与未掺杂的 YAG 晶体键合, 泵浦光从薄片边缘进入晶体, 泵浦面被切成一定角度, 泵浦光在晶体中沿折返光路传输, 多次经过增益介质, 储能呈近似高斯分布. Grigore 等^[21]研制的 Nd:YAG/YAG 复合介质薄片激光器采用平凹镜构型, 在 2 Hz 重复频率下的斜效率为 31%.

本文报道了采用激光二极管叠阵 (laser diode array, LDA) 侧面泵浦一定厚度的非键合薄片 Nd:YAG 所得到的实验结果. 我们在分析泵浦光在增益介质中的分布和吸收情况及测量多边形 Nd:YAG 薄片增益介质荧光分布的基础上, 实现了薄片激光器的准连续输出, 斜效率为 40.1%, 激光脉冲的能量稳定性为 2.7%(RMS), 输出光束衍射极限倍数 β 约为 10.

2 侧面折返泵浦多边形薄片泵浦吸收均匀性模拟分析

2.1 激光器系统结构

我们设计采用的 LDA 侧面折返泵浦多边形薄片激光器的结构如图 1 所示, 增益介质为正五边形 Nd:YAG 薄片晶体. 为方便观察, 下方主图部分仅给出一个方向的泵浦耦合结构, 图 1(a) 为五边旋转对称泵浦结构俯视图. 多边形 Nd:YAG 晶体

的侧面为泵浦光入射面, 呈梯形, 与端面成 45° . 泵浦光正入射晶体侧面, 如图 1(b) 所示. 晶体前端面为激光输出面, 镀激光波长的增透膜. 晶体后端面与散热结构相连, 镀激光波长高反膜.

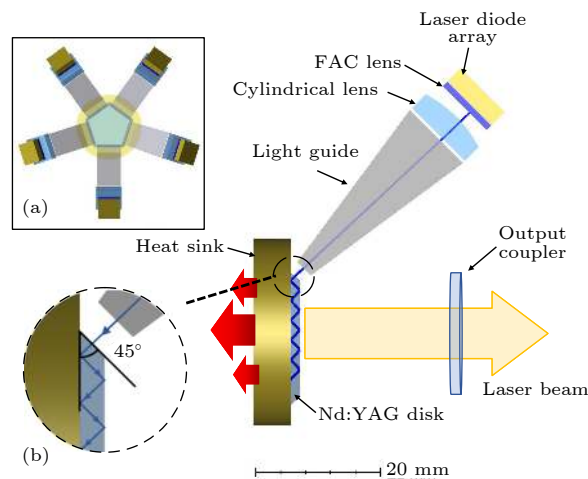


图 1 侧面泵浦多边形薄片激光器结构示意图 (a) 结构俯视图; (b) 局部放大图

Fig. 1. Schematic diagram of side-pumped polygonal thin-disk laser structure: (a) Top view of the structure; (b) partial enlarged view.

单个 LDA 包含 6 个巴条, 单个巴条上有 23 个发光点, 单条激光二极管快轴发散角大, 需要采用快轴准直器 (fast axis collimator, FAC) 将发散角压缩至近平行, 准直后的快轴发散角 $\leq 0.5^\circ$. 泵浦源发光面积较大约为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 需要通过缩束耦合结构将其压缩至与多边形薄片侧面 (入射面) 尺寸匹配. 通过计算追迹光线, 泵浦光经耦合结构到达泵浦面时的光斑尺寸约为 $12.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$, 传输效率约为 97.5%, 实际测量得到的传输耦合效率为 97%.

2.2 增益介质内泵浦光吸收分布特性

储能的平顶分布, 可以降低激光对薄片介质的损伤几率, 意味着激光输出的功率可以大幅提高. 同时, 薄片增益介质的泵浦光吸收分布直接影响到介质内部的热分布, 因此均匀的泵浦光吸收分布可以有效减小薄片增益介质温度梯度, 从而降低晶体热效应, 提高激光光束质量.

泵浦光通过缩束耦合结构由晶体侧面入射, 在介质内部符合全内反射条件, 以折返光路传输, 在传输过程中泵浦光被 Nd:YAG 介质吸收. 以折返

方式传输的泵浦光在增益介质厚度方向交叠, 从而保证厚度方向上均匀的吸收. 多个方向入射的泵浦光在介质中心区域交叠, 这种泵浦方式能够有效地提高增益介质内泵浦光吸收分布的均匀性. 侧面切角的非对称泵浦五边形构型有助于降低薄片晶体内寄生振荡.

增益介质内泵浦光的吸收可由 (1) 式表示

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha l}, \quad (1)$$

其中, α 为介质对特定波长的吸收系数, l 为泵浦光在介质内部传输的光程, I_0 为入射光强, I 为传输 l 距离后光强.

单个 LDA 的平均输出功率为 P_0 , 泵浦总功率 $P_{\text{total}} = 5P_0$. 增益介质内各点吸收的泵浦光强度分布用矩阵 $[I_{xy}]$ 表示. 增益介质吸收泵浦总功率为 $P_{\text{abs}} \cdot [I_{xy}]$, P_{abs} 可表示为:

$$[I_{xy}] = \begin{bmatrix} I_{11} & \cdots & I_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{m1} & \cdots & I_{mn} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$P_{\text{abs}} = \sum (I_{xy} \cdot \Delta s) \quad (3)$$

5 个方向入射的泵浦光在薄片内被吸收, 定义五边形结构前端面内切圆范围内吸收的泵浦光功率为有效泵浦功率, 表示为 $P_{\text{a-eff}}$. 其中五边形晶体前端面内切圆 ϕ 的半径为 R , 则有效泵浦功率可表示为:

$$P_{\text{a-eff}} = P_{\phi} = \sum_{\phi} (I_{xy} \cdot \Delta s), \quad (4)$$

$$\phi = \left\{ (x, y) \left| \left(x - \frac{m}{2} \right)^2 - \left(y - \frac{n}{2} \right)^2 \leq R^2 \right. \right\}. \quad (5)$$

有效泵浦效率 $\eta_{\text{a-eff}}$ 为有效泵浦功率占泵浦总功率的比值

$$\eta_{\text{a-eff}} = P_{\text{a-eff}} / P_{\text{total}}. \quad (6)$$

泵浦均匀性定义为内切圆区域内各点被吸收泵浦光强的均方根 RMS 值^[10]

$$\text{RMS} = \frac{1}{\bar{I}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}. \quad (7)$$

五边形 Nd:YAG 薄片增益介质的内切圆直径为 16 mm, 厚度 1.5 mm, 掺杂浓度 0.3% (原子分数), 基于 Zemax 光学设计软件建模计算得出泵浦光在增益介质内分布, 如图 2 所示. 有效泵浦效率 $\eta_{\text{a-eff}} = 65.1\%$, 均匀性 RMS 为 3.12%, 这说明泵浦光强度是均匀分布的.

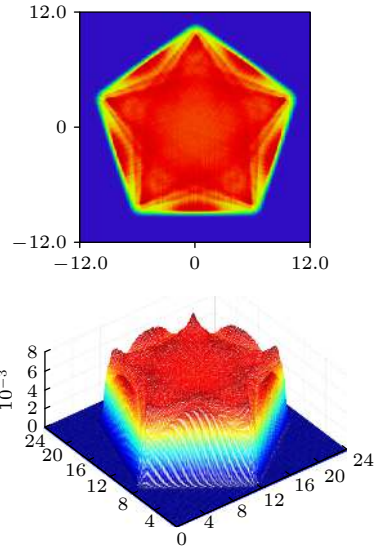


图 2 晶体内被吸收的泵浦光强的二维和三维分布
Fig. 2. 2-D and 3-D distributions of the absorbed pump laser in the crystal.

2.3 增益介质荧光分布

五边形 Nd:YAG 薄片增益介质的荧光分布如图 3 所示, 可见多边形增益介质内泵浦光分布均匀, 与仿真结果吻合.

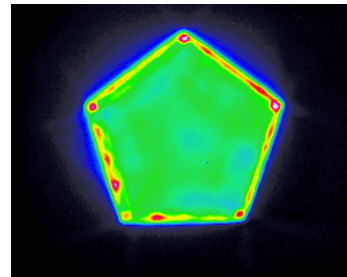


图 3 增益介质内荧光分布
Fig. 3. Fluorescence distribution in disk.

从图 3 可以看出增益介质中心区域 (内接圆 $R = 16 \text{ mm}$ 范围内) 荧光分布呈近平顶分布, 这表明侧面折返泵浦多边形薄片晶体可以实现增益介质内储能的平顶分布. 储能的平顶分布, 降低了激光对薄片介质的损伤几率, 同时也意味着可以有效降低增益介质热效应, 激光输出功率可以大幅提高.

3 实验系统及测量结果

薄片激光器实验装置如图 4 所示, 5 个 LDA 均匀分布在五边形增益介质周围, 增益介质前后端

面分别镀有 1064 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜. 增益介质后端面经金属化后通过铜焊接在微通道水冷热沉组件上. 二极管叠阵热沉和增益介质热沉分别通过冷却循环水机控制温度.

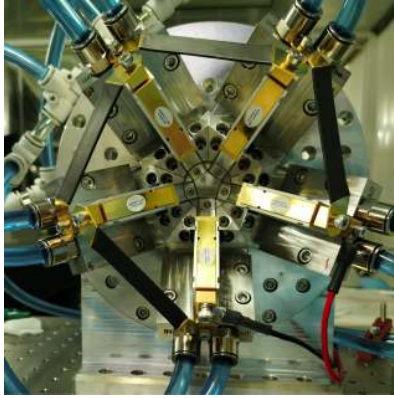


图 4 薄片激光器实验装置图
Fig. 4. Experiment setup of thin disk laser.

实验中薄片激光器采用平凹腔, 薄片晶体后端面作为平面反射腔镜, 激光输出耦合镜为凹面镜, 曲率半径为 1.5 m. 二极管叠阵工作频率 100 Hz, 脉宽 250 μ s, 图 5 给出了不同输出耦合镜透射率下, 输出能量随泵浦能量的变化趋势. 在相同泵浦能量下, 随着输出镜透射率的增加, 激光振荡阈值增加, 输出能量下降. 在输出镜透射率不变的情况下, 随着泵浦能量增加, 激光输出能量增加. 在输出耦合镜透射率 $T = 3\%$ 时, 当泵浦能量达到 2.2 J, 最大输出能量为 0.85 J, 此时斜效率为 40.1%. 当前输出条件下输出能量曲线没有明显饱和趋势, 还可进一步增加二极管激光器叠阵数量, 提高介质储

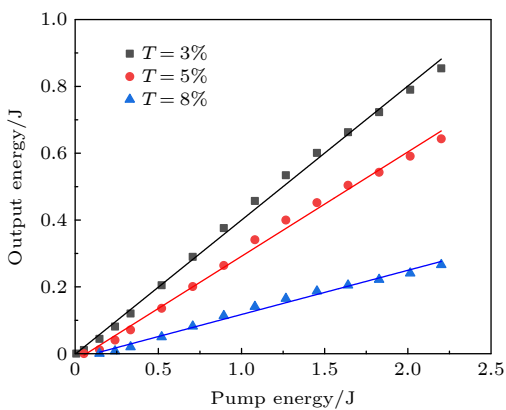


图 5 不同输出耦合镜透射率下输出能量随泵浦能量的变化关系
Fig. 5. Output energy vs pump energy under different transmittance of output coupling mirror.

能. 这也证明了泵浦光的均匀分布可以有效降低增益介质热效应, 在较高的泵浦能量下仍能保持很高的光-光效率. 通过 CCD 得到的激光束的强度分布如图 6 所示, 呈均匀的近平顶分布, 在稳腔下测得激光衍射极限倍数 β 约为 10.

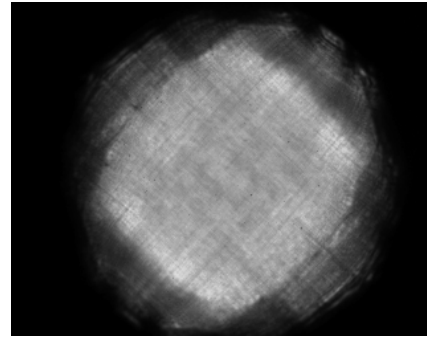


图 6 激光器输出光斑
Fig. 6. Output laser beam.

图 7 给出了脉冲重复频率对输出的影响, 当注入泵浦单脉冲能量为 2.2 J, 重复频率为 1 Hz 时, 输出能量为 0.89 J, 输出能量在重复频率为 100 Hz 时输出能量略有下降, 降为 0.85 J, 这是因为在高重复频率下由于晶体底部热沉的冷却能力有限, 晶体产生的热效应导致稳定腔偏离稳定区域, 从而导致激光输出功率的下降.

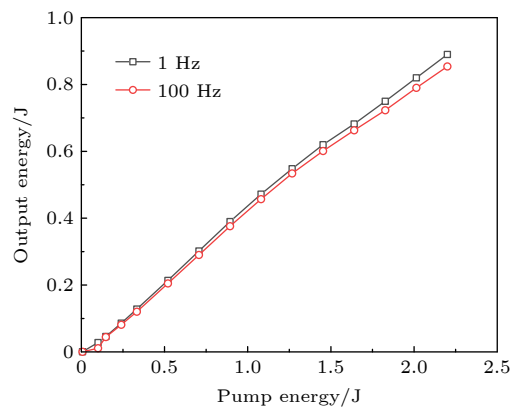


图 7 不同脉冲重复频率下薄片激光器输出能量
Fig. 7. Output energy of thin disk laser under different pulse repetition rates.

在重复频率为 1 Hz, 泵浦能量为 2.2 J 时, 激光器输出能量测试结果如图 8 所示, 输出能量稳定性为 2.7%(RMS). 实验结果证明 Nd:YAG 薄片激光器具有良好的能量稳定性.

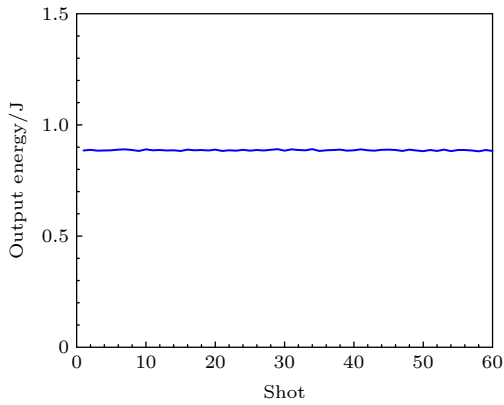


图 8 薄片激光器输出能量稳定性

Fig. 8. Output energy stability of thin disk laser.

4 结 论

本文对二极管叠阵侧面折返泵浦多边形 Nd:YAG 薄片激光器进行了理论和实验研究. 在保证储能均匀分布的条件下, 研制了前端面内切圆半径 16 mm 的多边形薄片激光器. 在 100 Hz 重复频率下, 当泵浦能量为 2.2 J 时, 获得 0.85 J 的激光输出, 光-光效率达 38.8%, 斜效率为 40.1%, 在 1 Hz~100 Hz 频率范围内输出能量保持稳定, 在重复频率 1 Hz 条件下测得单脉冲能量稳定性为 2.7%(RMS). 稳定, 在重复频率 1 Hz 在稳腔下测得激光衍射极限倍数 β 约为 10.

参考文献

[1] Coyle D B, Stysley P R, Poullos D, Fredrickson R M, Kay R B, Cory K C 2014 *Opt. Laser Technol.* **63** 13

- [2] Zhou S H, Zhao H, Tang X J 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 1605 (in Chinese) [周寿桓, 赵鸿, 唐小军 2009 *中国激光* **36** 1605]
- [3] Ostermeyer M, Mudge D, Veith P J, Munch J 2006 *Appl. Optics* **45** 5368
- [4] Pereira P, Weichelt B, Liang D W, Morais P J, Gouveia H, Abdou-Ahmed M, Voss A, Graf T 2010 *Appl. Optics* **49** 5157
- [5] Giesen A, Hügel H, Voss A, Wittig K, Brauch U, OPOWER H 1994 *Appl. Phys. B* **58** 365
- [6] Ongstad A P, Guy M, Chavez J R 2016 *Opt. Express* **24** 108
- [7] Yang H M, Feng G Y, Zhou S H 2011 *Opt. Laser Technol.* **43** 1006
- [8] Giesen A 2004 *Proc. SPIE* **5332** 212
- [9] Avizonis P V, Bossert D J, Curtin M S 2009 *Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference Baltimore, 2009, CThA2*
- [10] Li P L, Liu Q, Fu X, Gong M L 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 47
- [11] Loescher A, Negel J P, Graf T, Ahmed M A 2016 *Proc. of SPIE* **9893** 98930N
- [12] Jing W, Yu S Q, Ji X B, Xu T, Kang B, Deng J G, Yin W L, Yao Z Y, Huang H 2016 *Ceram. Int.* **43** 5334
- [13] Cai Y F 2009 *M.S. Thesis* (Beijing: Beijing University of Technology) (in Chinese) [蔡艳芳 2009 硕士学位论文 (北京: 北京工业大学)]
- [14] Gao S, Liu H, Wang D S, Gong M L 2009 *Opt. Express* **24** 21837
- [15] Lera R, Valle-Brozas F, Torres-Peiro S, Ruiz-De-La-Cruz A, Galan M, Bellido P, Seimetz M, Benloch J M, Roso L 2016 *Appl. Optics* **55** 9573
- [16] Zhang S J, Zhou S H, Lü H C, Tang X J, Guo L N, Wang C, Du T, Li F 2007 *Infrared Laser Eng.* **36** 505 (in Chinese) [张申金, 周寿桓, 吕华昌, 唐晓军, 郭丽娜, 王超, 杜涛, 李斐 2007 *红外与激光工程* **36** 505]
- [17] Dascalu T, Taira T 2006 *Opt. Express* **14** 671
- [18] Liu Q, Gong M L, Pan Y Y, Li C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2159 (in Chinese) [柳强, 巩马理, 潘圆圆, 李晨 2004 *物理学报* **53** 2159]
- [19] Liu Q, Fu X, Ma D, Yan X, He F, Huang L, Gong M, Wang D 2007 *Laser Phys. Lett.* **4** 712
- [20] Aminpour H, Pflaum C 2014 *Proc. of SPIE* **8959** 89591V
- [21] Grigore O V, Croitoru G, Dascalu T, Pavel N 2017 *Opt. Laser Technol.* **94** 86

Laser-diode-array side-zigzag-pumped polygon thin-disk laser*

Chen Qiao¹⁾²⁾ Qiu Ji-Si^{1)†} Zhang Xu³⁾⁴⁾ Ge Wen-Qi¹⁾Liu Yue-Liang¹⁾ Liu Hao¹⁾ Wang Hao-Cheng¹⁾1) (*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)2) (*School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)3) (*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)4) (*School of Physics Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 7 February 2021; revised manuscript received 13 April 2021)

Abstract

The high-average-power diode-pumped solid-state laser is one of the main research directions in the field of international laser technology, and has major applications in the fields like space exploration, precise detection, fusion research, etc. Under high-power pumping conditions, the conventional rods or slabs are not conducive to effectively removing waste heat. And the thermal effect causes the quality of the laser beam to deteriorate, which limits the further increase of the output power. In this article, the polygonal Nd: YAG thin disk is taken as a gain medium for the laser, and experiments verify that the side pumping method can obtain a higher output power of the all-solid-state pulsed laser while ensuring high beam quality. The gain medium is a regular pentagonal Nd: YAG thin disk with a side-cut-angle of 45° , the crystal thickness is 1.5 mm, and the diameter of the inscribed circle on the front face is 16 mm. Five laser diode arrays are placed symmetrically around the disk, and the pump surfaces are parallel to the sides of the disk. The pump laser propagates along the zigzag path between the upper and lower surface of the disk, thus improving the absorptive efficiency and pump uniformity. Through the optimization study of its gain characteristics and optical characteristics, the high-efficiency high-uniform pumping is achieved. Along the pump light coupling transmission path, the fast-axis collimator is used to control the beams in the fast-axis direction to be nearly parallel, and the large-area pump light is compressed through the coupling structure of cylindrical lens and light guide to match the size of the thin disk, and the pump coupling efficiency measured experimentally is 97%. When the Nd^{3+} doping concentration in the crystal is 0.3 at.%, the gain medium absorptive efficiency is 87%, and the root mean squared pump absorptive distribution uniformity in the gain medium is 3.21%. The fluorescence distribution of the gain medium is in good agreement with the simulated data. When the pump energy is 2.2 J, a laser output with an energy of 0.85 J is obtained, and optical-to-optical efficiency and slope efficiency are 38.8% and 40.1%, respectively. The single pulse energy stability is 2.7%(RMS) at 1 Hz frequency. In the stable cavity, the beam quality β - factor is measured to be about 10.

Keywords: thin disk laser, side pump, pump uniformity**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.By, 42.62.-b**DOI:** 10.7498/aps.70.20210287

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2018YFB0407400, 2018YFB0407402), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 6187030118).

† Corresponding author. E-mail: keith0311@163.com