光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023030602

固体激光器晶体吸收光场的设计仿真

闫立华*，程义涛，张厚博

（中国电子科技集团公司第十三研究所，石家庄 050051）

摘　要： 设计了3类8种二极管侧面泵浦结构，构建了相应的泵浦光学理论模型，采用有限元分析方法，计算了不同结构下的吸收效率和矩阵元素标准差。首先，在给定泵浦总功率、芯片间距、掺杂浓度等前提下，随着泵浦距离在0～5 mm内递增，8种泵浦结构中激光晶体的吸收效率呈降低趋势，矩阵元素标准差也逐渐减小，其中部分结构在近距离（0～0.3 mm）泵浦时矩阵元素标准差变化程度较大，在实际应用中应避免泵浦距离处于近距离区间。其次，在相同结构参量下，随着晶体掺杂浓度在0.6%～1.0%内增加，激光晶体的吸收效率提高，同时，掺杂浓度提升也是造成截面中心峰值降低或半径方向上光场凹陷的原因。因此，掺杂浓度和泵浦距离的匹配将是提升半径方向上均匀性分布的有效手段。

关键词： 侧面泵浦；吸收光场；有限元法；吸收效率；仿真

中图分类号： TN248.1　**文章编号：** 1001－5868(2023)02－0181－06

Design and Simulation of Crystal Absorption Light Field in Solid-state Laser

YAN Lihua, CHENG Yitao, ZHANG Houbo

(The 13th Research Institute China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, CHN)

Abstract: In this paper, three types of eight kinds of diode side-pumped structures were designed, and the corresponding theoretical model of pumping optics was constructed. The absorption efficiency and standard deviation of matrix elements under different structures were calculated by finite element analysis method. First, given the total pump power, chip spacing, doping concentration, etc., with the increase of the pump distance from 0～5 mm, the absorption efficiency of laser crystal in the eight pump structures tended to decrease, and the standard deviation of matrix elements also decreased gradually. The standard deviation of matrix elements varied greatly when some structures were pumped at a close distance (0～0.3 mm). In practical applications, the pump distance should be avoided in the above range. Secondly, under the same structural parameters, the absorption efficiency of the laser crystal was improved with the increase of the crystal doping concentration from 0.6% to 1.0%. At the same time, the increase of the doping concentration was the source of the reduced central peak of the cross section or light field depression in the radius direction. Therefore, the matching of doping concentration and pump distance will be an effective means to improve the uniformity distribution in the radius direction.

Key words: side-pumped; absorption light field; finite element method; pump efficiency; simulation

收稿日期：2023－03－06.

基金项目：国家重点研发计划项目(2020YFB1805903).

* **通信作者：**闫立华　**E-mail：**yanlihua_cetc@163.com

0 引言

二极管泵浦的固体激光器具有结构紧凑、转换效率高、功率稳定性好等优点，在激光探测、光电对抗、跟踪预警等军用领域应用广泛，是固体激光器的主流发展方向之一。作为全固态激光器的核心部件，泵源的设计直接影响激光器的光束质量，尤其是在远距离激光照射器的设计应用中[1-2]。

侧面泵浦固体激光器，能方便地通过增加泵浦尺寸以获得高功率激光增益或能量输出，但是由于泵浦光和激光的传输方向不同，该类激光器并不容易实现最佳的模式匹配[3-4]。在此类激光器中，由于激光晶体的截面区域泵浦不均匀，所得到横模增益强度不同，会引起激光光束质量恶化，为改善该问题，泵源设计至关重要[5-7]。

典型的侧泵结构可分为两类：环形泵浦和多边泵浦。环形泵浦指围绕晶体侧面，采用单芯片形式指向晶体轴心的泵浦结构；多边泵浦采用多芯阵列形式指向晶体轴心的泵浦结构。环形结构在设计上容易实现泵浦均匀，但可能存在装配工艺精度所导致的芯片指向错位问题，以及曲面焊接问题。可见，该方案设计难度较小，装配难度较大。多边泵浦则采用平面焊接方式，工程实现性较为容易。但多边泵浦中晶体吸收光场的设计相对复杂，需要同时考虑光场匀化和吸收效率的平衡，因此，泵浦仿真成为设计关键[8-9]。

本文针对以上两类泵浦结构，采用结构建模和有限元分析方法，进行吸收光场分布仿真，给出一系列结构与吸收光场的对应结果，为不同侧泵结构的系统性优化提供理论参考。

1 结构模型

本文设计了基本的侧泵结构，并将结构截面图列出，如图 1 所示，侧面由 N 个平面泵浦阵列构成，单阵列中包含芯片数量为 M，Nd：YAG 处于结构中心，M，N 取值见表 1。

为对比方便，设定泵浦总功率相等，所有结构均采用 30 只 1 cm 芯片。阵列内芯片间距假设为 0.4 mm，泵浦光指向 Nd：YAG 激光晶体轴心。激光晶体尺寸设定为 8 mm。泵源外形截面尺寸不大于 40 mm×40 mm。工艺上，芯片 P-N 欧姆接触面用匹配的钨铜材料作为芯片热沉，紫铜作为散热壳体材料，壳体外再辅以相应的散热系统。阵列芯片发光面与晶体表面间距 L 作为优化结构参数，其表达式为：

$$L=(\Phi_{\max}-\Phi_{\min})/2 \tag{1}$$

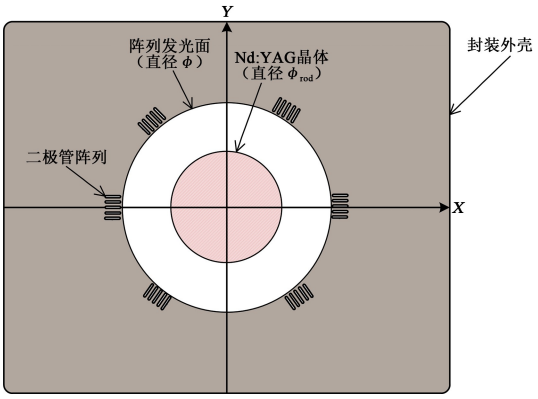


图 1 结构模型

表 1 泵源参数表

编号	M	N	编号	M	N
结构 1	1	30	结构 5	6	5
结构 2	2	15	结构 6	10	3
结构 3	3	10	结构 7	15	2
结构 4	5	6	结构 8	30	1

以上模型分别对应环形泵浦、多边泵浦的典型形式。

2 理论计算

由于沿晶体圆周方向上的阵列排布形式影响截面光场，而轴向的阵列排布影响激光传播方向上的均匀性，本设计中考虑的是截面光场均匀性，因此仅计算快轴对整体的影响。根据二极管芯片的发光特性，快轴方向将按高斯光束进行分析。本文快轴发散角为 45°，波长为 808 nm，光谱宽度为 3 nm，芯片发光尺寸为 1 μm。晶体内部的光场分布表达式为[10-11]：

$$I(x,y)=\left[\frac{2}{\pi}\right]^{1/2}\frac{I_0}{\omega_y(x)}\exp\left[-\frac{2y^2}{\omega_y^2(x)}-\alpha(\sqrt{R_0^2-y^2}+x)\right] \tag{2}$$

式中，I_0 是泵浦光光强，α 为 Nd：YAG 吸收系数，跟掺杂浓度相关，R_0 为晶体半径，$\omega_y(x)$为高斯光束在传播 x 处的 y 方向上的半宽。二极管阵列的束腰位于芯片发光位置，以晶体横截面的中心为原点，建立坐标系，结合泵浦距离 L，$\omega_y^2(x)$的表达式可变化为[11-13]：

$$\omega_y^2(x)=\omega_0^2\left[1+\left(\frac{\lambda(L+R_0+x)}{\pi\omega_0^2}\right)^2\right] \tag{3}$$

式中，λ 为泵浦光波长，ω_0 为泵浦光的束腰半径。

计算过程中，首先将激光晶体截面划分成网格单元进行离散化，每个网格单元的数据即矩阵元素数据。该数据集对应截面各位置的吸收强度，标准差则可以反映该数据集的离散程度，因此本文将以矩阵元素标准差代表均匀性，并进行分析。将所得结果与其他光学软件仿真效果进行对比[14]。

3　仿真分析

根据图 1 所示，泵浦距离 L 在 0～5 mm 内以 0.25 mm 为步长取值并进行一次分析；采用 0.6% 掺杂浓度进行仿真，得到如图 2、3 所示的仿真结果。

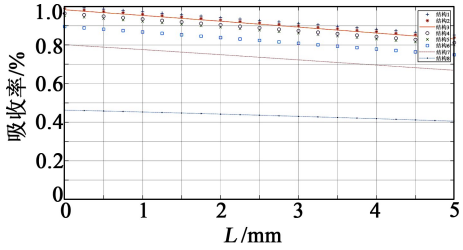


图 2　0.6%掺杂浓度时吸收率与泵浦距离的关系

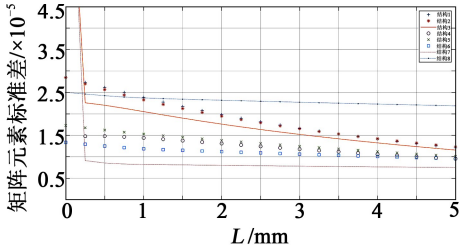


图 3　0.6%掺杂浓度时矩阵元素标准差与泵浦距离的关系曲线

采用 1.0% 掺杂浓度进行仿真，得到如图 4、图 5 所示仿真结果。

图 2～5 表明，在统一结构模型中，在相同掺杂浓度的前提下，随着泵浦距离的增加，吸收率单调降低。矩阵元素标准差数据同样呈减小趋势，但是并非线性相关，该数据在部分结构中（结构 3、结构 7 等）分别出现先快速变化，然后缓和的趋势。在结构设计中，建议避开这些快速变化区间，本文中指的是

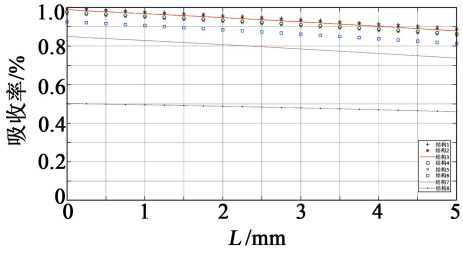


图 4　掺杂浓度为 1.0%时吸收率与泵浦距离的关系

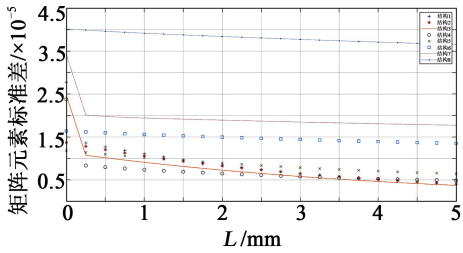


图 5　1.0%掺杂浓度下矩阵元素标准差与泵浦距离的关系

0～0.3 mm。以上趋势体现的是数据差异性，但是由于工程应用中需要考虑光场实际效果，因此，将继续仿真并在下文列出。

以下将针对结构 1、结构 4、结构 6 的吸收光场效果进行仿真。结构 2、3 和 5 属于过渡情况，可由相邻结构的吸收光场类比得出；结构 7、8 分别为双边泵浦、单边泵浦的特殊应用，吸收效果图不再罗列。结构 1、4 和 6 在 0.6%，1.0% 两种掺杂浓度下不同泵浦距离（L = 0.5，1.5，2.5 mm）的吸收光场分布仿真结果如图 6～21 所示。其中（a）为截面光

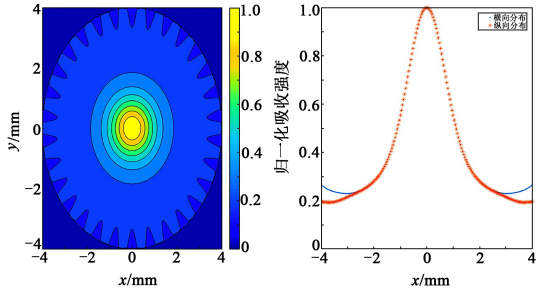


图 6　泵浦距离为 0.5 mm，0.6%掺杂浓度下结构 1 的吸收光场分布

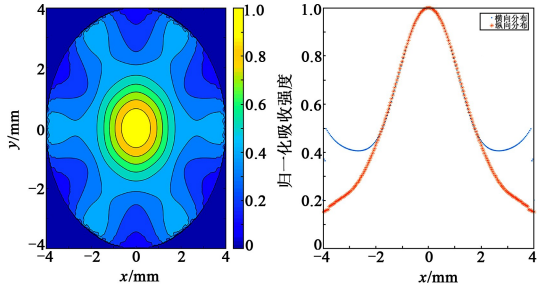


图 7　泵浦距离为 0.5 mm，0.6%掺杂浓度下结构 4 的吸收光场分布

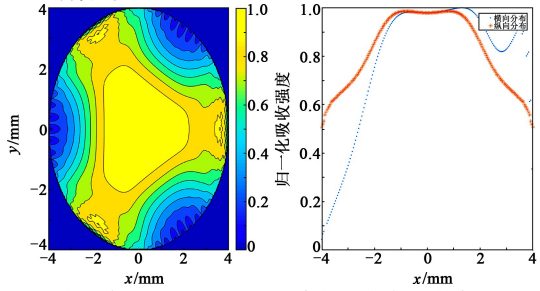


图 8　泵浦距离为 0.5 mm，0.6%掺杂浓度下结构 6 的吸收光场分布

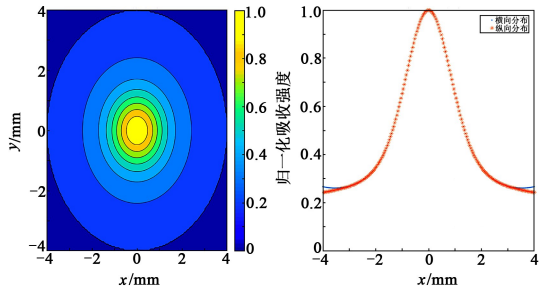


图 9 泵浦距离为 1.5 mm,0.6%掺杂浓度下结构 1 的吸收光场分布

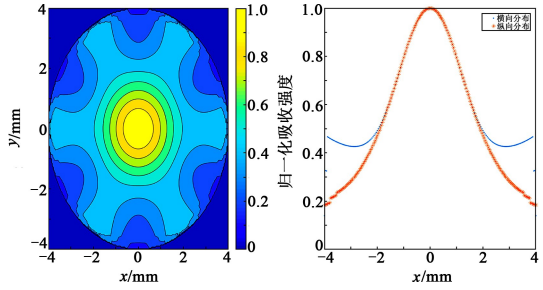


图 10 泵浦距离为 1.5 mm,0.6%掺杂浓度下结构 4 的吸收光场分布

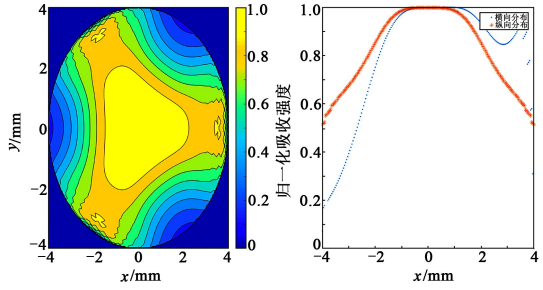


图 11 泵浦距离为 1.5 mm,0.6%掺杂浓度下结构 6 的吸收光场分布

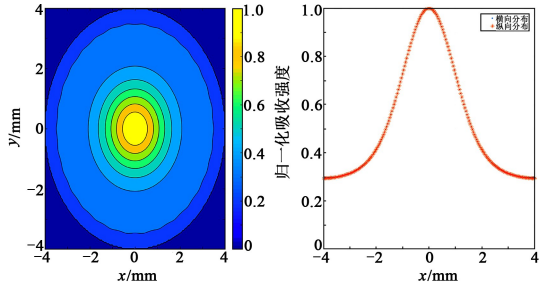


图 12 泵浦距离为 2.5 mm,0.6%掺杂浓度下结构 1 的吸收光场分布

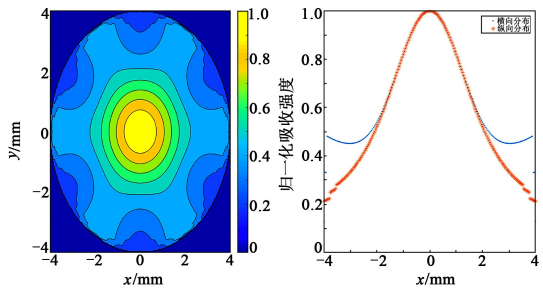


图 13 泵浦距离为 2.5 mm,0.6%掺杂浓度下结构 4 的吸收光场分布

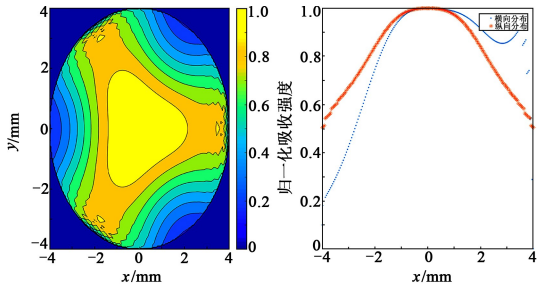


图 14 泵浦距离为 2.5 mm,0.6%掺杂浓度下结构 6 的吸收光场分布

强分布图,(b)为横轴方向和纵轴方向的光场分布。

图 6～15 表明,在 0.6%掺杂浓度下,沿着横轴和纵轴方向,在 0.5～2.5 mm 泵浦区间内,光强基本上呈现高斯分布,其中中间峰值和远端峰值高度比逐渐降低。图 16～23 表明,在 1.0%掺杂浓度下,沿着横轴和纵轴方向,在上述泵浦区间内,随着泵浦距离的增加,部分结构的中间峰值和边缘峰值

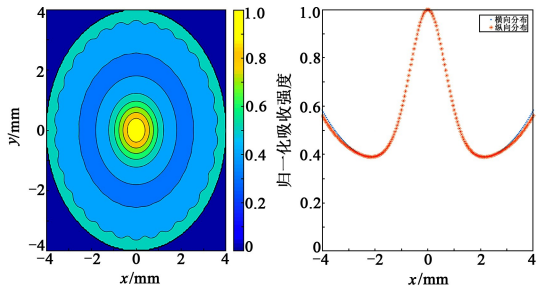


图 15 泵浦距离为 0.5 mm,1.0%掺杂浓度下结构 1 的吸收光场分布

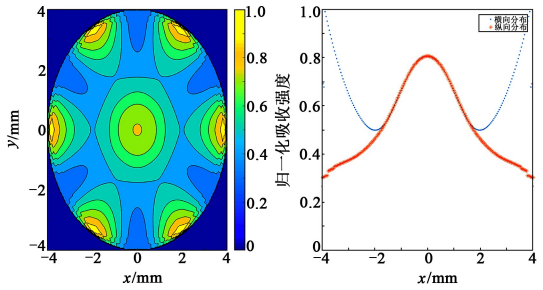


图 16 泵浦距离为 0.5 mm,1.0%掺杂浓度下结构 4 的吸收光场分布

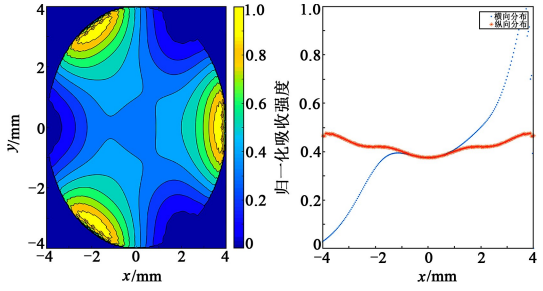


图 17 泵浦距离为 0.5 mm,1.0%掺杂浓度下结构 6 的吸收光场分布

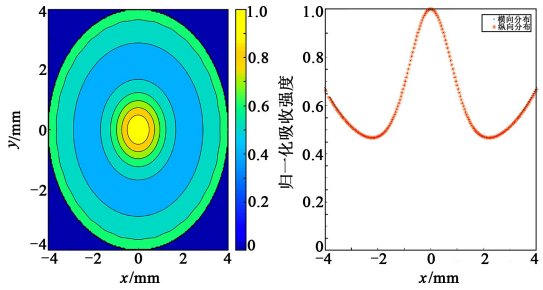


图 18　泵浦距离为 1.5 mm，1.0%掺杂浓度下结构 1 的吸收光场分布

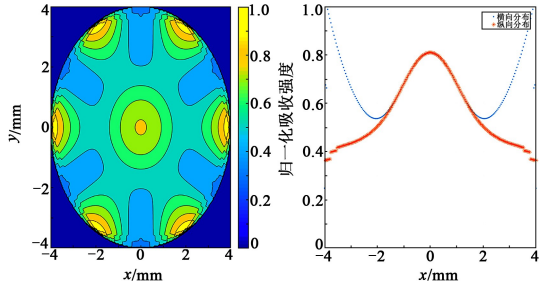


图 19　泵浦距离为 1.5 mm，1.0%掺杂浓度下结构 4 的吸收光场分布

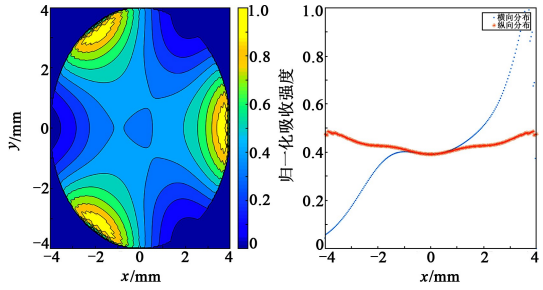


图 20　泵浦距离为 1.5 mm，1.0%掺杂浓度下结构 6 的吸收光场分布

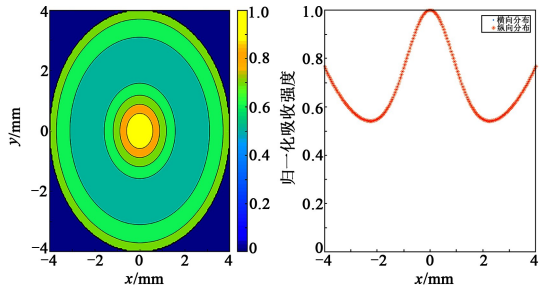


图 21　泵浦距离为 2.5 mm，1.0%掺杂浓度下结构 1 的吸收光场分布

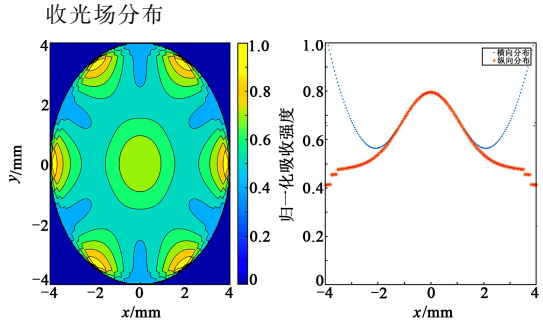


图 22　泵浦距离为 2.5 mm，1.0%掺杂浓度下结构 4 的吸收光场分布

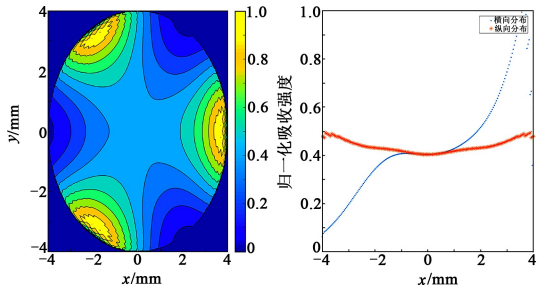


图 23　泵浦距离为 2.5 mm，1.0%掺杂浓度下结构 6 的吸收光场分布

高度比快速下降，部分中间峰值降低到低于边缘强度，这是设计中要避免的不利因素。

以上是不同泵浦结构的系列化光学仿真结果，在工程化方面，要按照实际要求分别选择。

4　结论

本研究从二极管激光器泵浦结构设计出发，系统地计算了晶体内吸收光场分布。从数据上看，在不同泵浦结构中，泵浦距离对吸收光场的矩阵元素的标准差和吸收率影响趋势接近。从泵浦效果上看，掺杂浓度、泵浦距离、结构模型匹配才能得到比较均匀的泵浦光场。文中结构避免近距离（0～0.3 mm）泵浦对均匀性造成的影响，避免远距离高浓度掺杂（1.0%）所造成的沿半径方向的光场凹陷。但是，本文所列的仅是结构模型、泵浦距离、掺杂浓度等变量变化的情况，在工程化过程中，需要进一步结合实际综合考量。

参考文献：

[1]　王小发，曹腾飞，方泽鹏. 高功率 LD 侧面单向泵浦激光模块的理论研究[J]. 半导体光电，2021，42(5)：641-645.
Wang Xiaofa，Cao Tengfei，Fang Zepeng. Theoretical study of high power led unidirectional side-pumped laser module[J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(5)：641-645.

[2]　Baumgart M，Glassl C，Tortschanoff A，et al. In-situ heat input and high resolution thermal expansion sensing in a miniaturized side-pumped DPSS laser [J]. Procedia Engineering，2010，5：560-563.

[3]　Shen Jianping，Huang Xin，Jiang Songtao，et al. Design and development of a high-performance LED-side-pumped Nd：YAG rod laser[J]. Chinese Phys. Lett.，2022，39(10)：104201.

[4]　Graf T，Ferguson A I，Bente E，et al. Multi-Watt Nd：YVO_4 laser，mode locked by a semiconductor saturable absorber mirror and side-pumped by a diode-laser bar[J]. Opt. Commun.，1999，159(1/3)：84-87.

[5] Chen X Y, Yu Y J, Wang C, et al. Study on the uniformity of temperature field distribution in LD side-pumped laser[J]. J. for Light-and Electronoptic, 2013(15): 2067-2071.

[6] 张 彪, 杨爱粉, 杨照金, 等. 高功率LD阵列侧面泵浦晶体的增益分布研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 883-886.
Zhang Biao, Yang Aifen, Yang Zhaojin, et al. Study of the pumped uniformity of the solid state[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(9): 883-886.

[7] 于永吉, 王 超, 陈薪羽, 等. 双拱形LDA侧面泵浦Nd:YAG光场均匀性研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 847-851.
Yu Yongji, Wang Chao, Chen Xinyu, et al. Study for pumping uniformity in double-arched LDA arched LDA side-pumped Nd:YAG laser[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(8): 847-851.

[8] 张 彪, 高 玮, 杨照金, 等. LD阵列侧面泵浦棒状激光介质内的光场研究[J]. 应用光学, 2009, 30(2): 338-343.
Zhang Biao, Gao Wei, Yang Zhaojin, et al. Light field distribution in side-pumped rod-shaped laser medium of laser diode arrays[J]. J. of Appl. Opt., 2009, 30(2): 338-343.

[9] 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): 1-21.
Fu Xing, Liu Tinghao, Lei Xinxing, et al. High energy diode-pumped rep-rated nanosecond solid-state laser[J]. Chinese J. of Laser, 2021, 48(15): 1-21.

[10] 蔡志强, 姚建铨, 温午麒, 等. LD侧泵激光器抽运光和温度分布数值研究[J]. 光电子·激光, 2004, 15(11): 1305-1310.
Cai Zhiqiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi, et al. Simulation of absorbed power and temperature distribution in LD side-pumped laser[J]. J. of Optoelectronics·Laser, 2004, 15(11): 1305-1310.

[11] 闫立华, 任 浩, 刘小文, 等. 半导体侧泵模块激光晶体内吸收光场分析[J]. 激光与红外, 2014, 44(7): 720-724.
Yan Lihua, Ren Hao, Liu Xiaowen, et al. Absorption property of LDA side pumped laser crystal[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(7): 720-724.

[12] 郭敏超, 王明娣, 张胜江, 等. FR-4覆铜板飞秒激光微孔加工工艺研究[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 135-143.
Guo Minchao, Wang Mingdi, Zhang Shengjiang, et al. Techniques for femtosecond laser processing of micro-holes in FR-4 copper cladlaminate[J]. Chinese J. of Laser, 2020, 47(12): 135-143.

[13] 雷 军. 环形高增益LD泵浦激光放大器研制技术[R]. 2018年版中国工程物理研究院科技年报, 2018: 119-125.
Lei Jun. Development technology of loop high gain LD pumped laser amplifier[R]. 2018 Edition Science and Technology Annual Report of China Academy of Engineering Physics, 2018: 119-125.

作者简介:

闫立华(1980—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为半导体激光技术与应用。