

引用格式:万玮华,郝培育,孟轩,等.一种高效率LD直接端面泵浦技术研究[J].电光与控制,2018,25(8):84-87. WAN W H, HAO P Y, MENG X, et al. A high-efficiency LD direct end-surface pumping technology[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(8):84-87.

## 一种高效率LD直接端面泵浦技术研究

万玮华<sup>1,2</sup>, 郝培育<sup>2</sup>, 孟轩<sup>2</sup>, 沈兆国<sup>2</sup>

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 利用LD直接端面泵浦技术实现的固体激光器,能很好地适用于复杂的机载环境,在工程应用上具有重要的研究价值,研究高效率LD直接端面泵浦技术的设计方法,能获得高光光转化效率的静态激光输出,对后续实现高能量的LD端泵激光光源具有重要的指导意义。针对一种纵向均匀排布的20 Bar LD阵列,利用ZEMAX软件仿真并设计了两种四棱柱光学耦合系统,将端泵阵列的泵浦光通过耦合系统聚焦至工作物质内,两种耦合系统的光束焦点位置各不相同,通过改变聚焦焦点的位置,研究了不同状态下激光能量输出情况。经实验结果可知,针对此平-平腔构型,工作物质(1at%)4 mm×4 mm×10 mm的结构尺寸下,设计泵浦光均匀照射工作物质前端面,焦点距离工作物质前端面为5.5 mm,此时,泵浦光与振荡光的模式匹配程度最高,在此状态下LD直接端面泵浦固体激光器的最大光光转化效率能高达40%。

**关键词:** 光学耦合系统; ZEMAX; 光光转化效率; 端面泵浦

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.08.017

## A High-Efficiency LD Direct End-Surface Pumping Technology

WAN Wei-hua<sup>1,2</sup>, HAO Pei-yu<sup>2</sup>, MENG Xuan<sup>2</sup>, SHEN Zhao-guo<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** The solid-state laser generated by using the LD direct end-surface pumping technology can be used in complex airborne environments, and it has high research value in engineering application. The static laser output with high light conversion efficiency can be obtained through the successful study of the design method of the high-efficiency LD direct end-surface pumping technology, which is of great significance to the subsequent realization of the high-energy LD end-surface pumping laser illuminant. This paper focuses on a kind of 20 Bar LD array with vertical and even distribution, and two kinds of optical coupling systems of quadrangular prism are simulated and designed by using ZEMAX software. The pump light of the end-surface pumping array is focused into the working substance by using the coupling system. The beam focusing positions of the two coupling systems are different. By changing the focusing position, the output status of laser energy in different states is studied. The experiment goes as follows: in view of this flat-flat cavity configuration and with the size of the working material (1at%) being 4 mm×4 mm×10 mm, the pump light is designed to evenly illuminate the front surface of the working material and the distance from the focus to the front surface of the working material is designed to be 5.5 mm. The result shows that at this time, the mode matching degree between the pump light and the oscillation light is the highest, in which state the maximum light conversion efficiency of the LD direct end-surface pumping solid-state laser can be as high as 40%.

**Key words:** optical coupling system; ZEMAX; light conversion efficiency; end-surface pump

收稿日期:2017-08-14

修回日期:2017-09-14

基金项目:国家自然科学基金(61575099)

作者简介:万玮华(1993—),男,江西景德镇人,硕士生,研究方向为激光器设计与应用。

## 0 引言

在激光器领域,二极管泵浦的主要方式有LD侧面泵浦与LD端面泵浦两种,相比于侧面泵浦,LD端面

泵浦具有效率高、模式匹配度好等特点,能获得更高的光光转化效率和良好的光束质量,具有广阔的研究空间,依据耦合方式的不同,LD 端面泵浦又分为直接端面泵浦与光纤耦合泵浦两种<sup>[1]</sup>。相比于直接耦合泵浦,光纤耦合的方式能获得圆对称均匀分布的泵浦光,可以明显改善泵浦光的光束质量,使得泵浦光场与振荡激光场在空间上能具有很好的模式匹配,易获得较大的泵浦效率,但是,受光纤材料的限制,在机载的高低温与振动环境下,光纤的稳定性不好,环境适用性不强,在工程应用上仍然以直接耦合泵浦的方式居多,研究并设计良好的耦合聚焦系统,能将泵浦光更好地耦合至工作物质内,获得较高的光光转化效率,对实现高效率、高能量的 LD 端面泵浦激光输出具有重要的研究意义。

为了实现良好的光束质量,在实验室环境下,端泵技术研究多使用带尾光纤输出的 LD 阵列,使用光纤耦合并外加聚焦透镜聚焦的方式进行泵浦,与此相关的文献报道较多,主要有:文献[2]利用四柱透镜耦合系统实现了光光转化效率为 5.6% 的 473 nm TEM<sub>00</sub> 模式激光输出;文献[3]基于光纤耦合设计进行了模式匹配的理论推导,实现 8 W 的 532 nm 绿光激光输出;文献[4]同样采用光纤耦合的方式,研究了自聚焦透镜设计对泵浦耦合效率的影响等;但未见有关 LD 直接泵浦技术研究的报道。

无法适应机载环境是光纤耦合泵浦的弊端之一,另外,光纤耦合的 LD 端泵模块的峰值功率一般无法做大,目前只能达到百瓦量级,限制了端面泵浦激光器输出的能量,本文针对一种国产均匀排布高功率的 20 Bar LD 阵列,设计了两种四棱柱镜光学耦合系统,通过对比两种泵浦耦合系统的耦合效果,基于激光器设计构型,获得了实现高效率 LD 直接端面泵浦的设计方法。

## 1 基本理论

### 1.1 端泵效率理论

基于对空间相关的四能级速率方程的分析,运用文献[5-6]中的方法得到激光器阈值功率  $P_{th}$ 、输出功率  $P_{out}$ 、激光器斜效率  $\eta_s$  分别为

$$P_{th} = \frac{\delta I_{sat}}{2\eta_p l} \frac{1}{J_1} \quad (1)$$

$$P_{out} = \frac{T}{\delta} \frac{J_1^2}{J_2} \eta_p \left( P_{in} - \frac{I_{sat}}{\eta_p l} \frac{\delta}{2} \frac{1}{J_1} \right) \quad (2)$$

$$\eta_s = \frac{T}{\delta} \eta_p \frac{J_1^2}{J_2} \quad (3)$$

式中: $T$  为反射镜的透过率; $\delta$  为腔内的单程损耗; $I_{sat}$  为腔内的饱和光强; $l$  为工作物质的长度; $\eta_p$  为泵浦光的泵浦效率; $J_1 = \iiint_{active} \varepsilon(x,y,z)r(x,y,z)dV$ ,  $J_2 = \iiint_{active} \varepsilon(x,y,z)^2 r(x,$

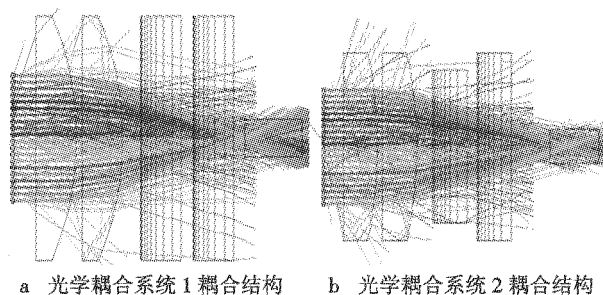
$y,z)dV$ ,  $\varepsilon(x,y,z)$  与  $r(x,y,z)$  分别为振荡光场与泵浦光场的模式分布函数; $\frac{J_1^2}{J_2}$  为重叠效率因子,其表征了泵浦光场与振荡光场的空间重叠度,即模式匹配程度。

从式(2)、式(3)可以看出,激光的输出功率与斜效率正比于重叠效率因子,文献[7-8]将泵浦光场  $r(x,y,z)$  看成是满足高斯分布的圆对称型函数,对上述理论进行了详细的理论推导与仿真,其端面泵浦采用的耦合方式为光纤耦合,而 LD 端面采用直接泵浦耦合的方式,受到 LD 阵列光源与耦合系统的设计限制,泵浦光场的分布函数并不规则,无法准确地将该函数描述出来,对最佳耦合效率的问题,仅能通过具体的实验进行研究。

### 1.2 实验装置

本实验采用的端面泵浦单元由国产的 20 Bar 二维 LD 阵列构成,其峰值功率最大能达到 2 kW,阵列横向尺寸较大,设计了两种四柱透镜耦合系统,可分别对阵列横向与纵向的发散角进行压缩,泵浦光经两种四柱透镜耦合系统后能将泵浦光束聚焦至工作物质内的不同位置处,四柱透镜耦合系统采用下列两种思路进行设计:1) 如图 1a 所示,聚焦点处于工作物质端面附近,工作物质前端面功率密度高,能在工作物质前端获得较大的粒子激发;2) 如图 1b 所示,工作物质端面的泵浦光束均匀,耦合焦点位于工作物质内,能较高效地将泵浦光束耦合至工作物质内。

当泵浦光聚焦的焦点处于工作物质不同位置时,泵浦光的光场分布各不相同,忽略仿真中的各类杂散光,考虑在泵浦效率一定时,依据 1.1 节中的理论,泵浦光与振荡光重叠效率因子的变化会影响激光输出功率与泵浦耦合的效果。两种泵浦结构与焦点位置如图 1 所示。



a 光学耦合系统 1 耦合结构 b 光学耦合系统 2 耦合结构

图 1 端面泵浦耦合系统结构

Fig. 1 The design of the coupling system of the end-surface pump

利用 ZEMAX 软件进行仿真,可得到泵浦光经两种光学耦合系统后,工作物质端面处的光场强度分布,如图 2 所示:焦点较近的光学耦合系统 1,其端面的峰值功率较高,光斑较小;而焦点较远的光学耦合系统 2,其工作物质端面的泵浦光场分布均匀。

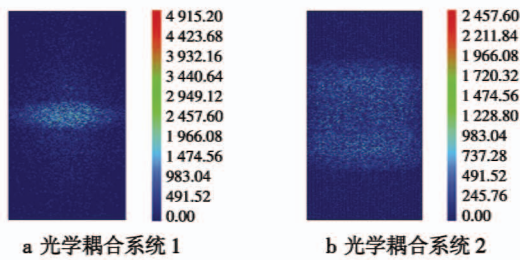


图 2 工作物质端面的泵浦光分布

Fig. 2 The distribution of pumping light on the end surface of the working material

以上述两种光学耦合系统为基础,搭建简易的端面泵浦激光器,工作物质选用单掺 Nd:YAG 晶体,掺杂浓度为 1at%,在泵浦面镀上 808 nm 增透膜与 1064 nm 的全反射膜(反射率能达到 99.8%),晶体的尺寸选为 4 mm × 4 mm × 10 mm 的长方体,能与泵浦光场的光斑形状相匹配。为使激光器容易起振,尽可能减少腔内的损耗,选择的半反射镜的反射率为 80%,激光器结构光路如图 3 所示。

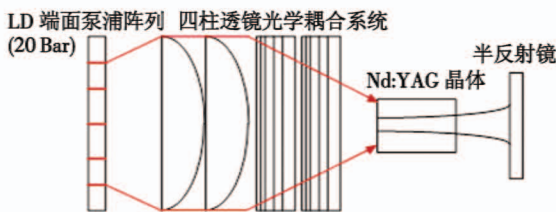


图 3 激光器结构光路图

Fig. 3 The optical path of the laser

通过改变耦合系统出光面与工作物质之间的相对距离,能使焦点聚焦在工作物质内不同的位置,进而研究如何设计优化可获得最佳的泵浦耦合效果。

## 2 实验结果

针对光学耦合系统 1,其泵浦端面光斑较小,焦点光斑大小为 3 mm × 0.5 mm,面功率密度较大,调整晶体 Nd:YAG 与光学耦合系统的相对位置,使焦点分别位于工作物质端面的前方 0 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm, 3 mm, 4 mm 时,激光器输出情况如图 4 所示。

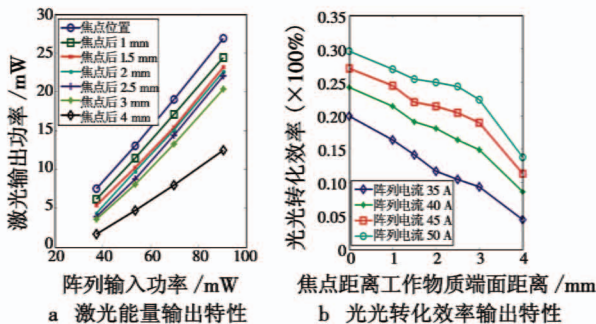


图 4 基于光学耦合系统 1 的激光器输出情况

Fig. 4 The laser output based on the coupling system 1

从图 4 可知,光学耦合系统 1 焦点位置的改变对激光输出的功率具有一定的影响,对此耦合系统,焦点位于工作物质端面时能获得较高的光光转化效率,随着工作物质相对焦点位置的变化,激光的输出功率、斜效率与光光转化效率均随之下降,焦点与工作物质前端的距离小于 4 mm 时,影响出光功率与斜效率的主要因素是泵浦光场的分布,即重叠因子对输出功率的影响。当焦点与工作物质距离变远,泵浦光斑照射至工作物质端面的面积变大,会导致部分光束无法成功耦合至工作物质内,此时出光效率由重叠因子与泵浦效率  $\eta_p$  共同决定。

针对远焦点光学耦合系统 2,实验测量了工作物质前端面与耦合系统出光面的距离分别为 4.5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm 时的激光输出情况,在上述各位置时,利用 ZEMAX 进行光束追迹,可得泵浦光焦点与工作物质前端面的相对距离分别为 11 mm, 9.3 mm, 7.5 mm, 5.5 mm, 4.2 mm 时的激光器的输出情况,如图 5 所示。

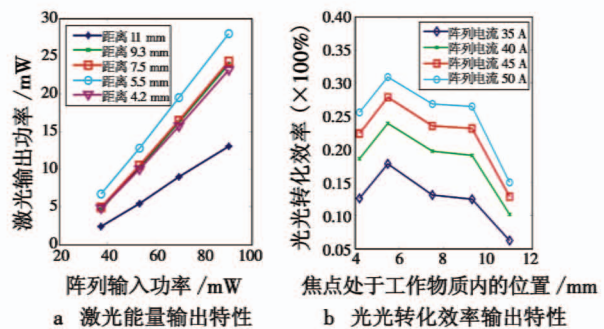


图 5 基于耦合系统 2 的激光器输出情况

Fig. 5 The laser output based on the coupling system 2

从图 5 可以看出,选取 Nd:YAG 工作物质的长度为 10 mm,当焦点距离工作物质前端面 11 mm 时,聚焦在工作物质外,获得的输出功率十分低,随着焦点进入工作物质内部并逐渐前移,激光输出的功率与光光转化效率呈先增大后减小的趋势,实验中存在最佳的激光输出位置,此时焦点距离前端面 5.5 mm,泵浦焦点约处于工作物质的 1/2 处,激光输出功率与光光转化效率皆能达到最大,泵浦光与振荡光的模式匹配程度也最高,重叠因子最大。

对比两种光学耦合系统可知,泵浦光的焦点聚焦至工作物质外时,对泵浦光的有效利用率较低,无法获得更高的光光转化效率;而将焦点会聚至工作物质内,焦点位置的不同,能影响泵浦光场的分布,进而改变泵浦光场与振荡光的重叠因子,存在一个最佳耦合位置,此时重叠因子能达到最大,激光器能获得更高的光光转化效率。在最佳位置处对激光器的输出性能进行后续测量,可得到如图 6 所示的输出特性关系。

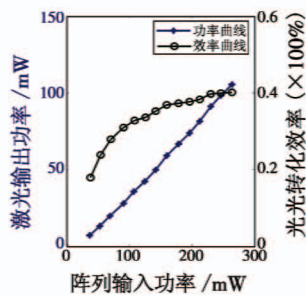


图 6 最佳耦合位置处的激光输出性能

Fig. 6 Laser output performance in the optimum coupling position

选用光学耦合系统 2, 泵浦焦点位置距离工作物质前端面 5.5 mm, 通过改变阵列的驱动电流来改变阵列注入的能量, 泵浦功率较小时, 随着阵列注入能量的提高, 激光器输出能量呈线性增长, 输出的能量暂时未达到饱和, 但是泵浦光 - 振荡光的光光转化效率却随着泵浦功率的增加逐步趋于饱和, 基于上述构型, LD 直接耦合端面泵浦激光器最大能获得 40% 的光光转化效率。

### 3 结论

通过对比两种不同的耦合光学系统, 研究了最佳泵浦耦合效率问题, 耦合系统的焦点与工作物质的相对位置会影响工作物质对泵浦光的吸收效率, 以及泵浦光场的空间分布, 泵浦光场与激光振荡光场分布重叠区域越大, 泵浦效率越高。基于此端面泵浦构型, 由实验验证可得, 将泵浦光的焦点聚焦至 4 mm × 4 mm × 10 mm 工作物质的前端面 5.5 mm 处, 能获得最佳的泵浦效果, 在上述最佳状态下, 激光器静态调试的光光转化效率最大能达到 40%, 激光动态输出的能量由光光转化效率和动

静比两者共同决定, 此高效率的 LD 直接端面泵浦系统能应用于对后续高能端泵激光器的设计, 对后续实现机载环境下的 LD 端泵激光器具有重要的指导意义, 并且此 LD 直接端面泵浦耦合系统的研究思路与方法对于后续光学耦合系统的设计具有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] HAO Y C, NING J P, YANG J S, et al. Coupling systems in LD end-pumped solid-state lasers [J]. Laser Journal, 2002, 23(1): 25-27.
- [2] 薛珮瑶, 何燕波, 薄报学, 等. LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器耦合光学系统的设计[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2008, 31(1): 89-91.
- [3] 赵致民, 陈浩伟, 解慧明, 等. LD 端面泵浦全固态绿光激光器耦合系统研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2004, 34(6): 669-672.
- [4] 邢俊红, 焦明星, 刘芸. 自聚焦透镜在全固态激光器中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 127-131.
- [5] LAPORTA P, BRUSSARD M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(10): 2319-2326.
- [6] KUBODDERA K, OTSUKA K. Single-transverse-mode LiNdP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> slab waveguide laser [J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(2): 653-659.
- [7] 马欲飞. 全固态高重频窄脉宽 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 王成. LD 端面泵浦高重频电调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] 裴雪兵, 胥文清, 陈吉超. 一种装舰约束条件下的武器通道作战能力计算方法[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(2): 111-116.
- [9] 余戊瞳, 吴玲, 卢发兴. 舰艇摇摆下射界动态变化对武器目标分配的影响[J]. 兵工学报, 2015, 36(9): 1819-1824.
- [10] 俞晓飞, 杜新宇. 防空杀伤区拟合算法设计[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(9): 3470-3474.
- [11] 代进进, 李相民, 刘培培, 等. 舰艇编队网络化反导作战动态目标分配方法[J]. 电光与控制, 2013, 20(5): 15-20.
- [12] 黎子芬, 李相民, 代进进, 等. 编队对地动态联合火力分配建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(12): 2900-2905.

(上接第 69 页)

- [2] 桂秋阳, 邱志明. 垂直发射武器与舰炮武器火力交叉的判断[J]. 系统仿真实报, 2008, 20(1): 33-36.
- [3] 桂秋阳, 邱志明. 基于垂直发射武器的火力交叉判断模型[J]. 兵工学报, 2008, 29(11): 1373-1378.
- [4] 邱千钧, 石章松, 王航宇. 一种舰载多武器火力兼容优先级控制模型和方法[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(1): 68-70.
- [5] 李亦伟, 邢昌风. 射面交叉分析及武器控制方法研究[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(3): 94-97.
- [6] 王慕鸿, 周智超. 基于弹道仿真的舰艇近末端防空火力兼容判断方法[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(4): 113-117, 130.
- [7] 余亮, 邢昌风, 石章松. 协同防空作战中的空域资源建模[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(1): 54-59.