



多单管堆叠半导体激光器热分析及光纤耦合模拟仿真设计

王娇娇, 石琳琳, 马晓辉, 张贺, 李岩, 李卫岩, 徐莉

引用本文:

王娇娇, 石琳琳, 马晓辉, 等. 多单管堆叠半导体激光器热分析及光纤耦合模拟仿真设计[J]. *发光学报*, 2021, 42(1): 104–110.

WANG Jiao-jiao, SHI Lin-lin, MA Xiao-hui, et al. Thermal Analysis and Fiber Coupling Simulation Design of Multi-single Emitters Stacked Semiconductor Laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(1): 104–110.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200243>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于曲面空间合束的多单管半导体激光光纤耦合

Fiber Coupling of Multi-single Emitters Diode Lasers Based on Curved Surface Spatial Combination
发光学报. 2018, 39(9): 1280–1284 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183909.1280>

三波长合束单管激光器光纤耦合模块设计

Design of Fiber-coupled Laser Diode Module Based on Three-wavelengths Multiplexing by ZEMAX
发光学报. 2018, 39(3): 337–342 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183903.0337>

基于ZEMAX高功率半导体激光器光纤耦合设计

Fiber Coupling Design of High Power Semiconductor Laser Based on ZEMAX
发光学报. 2013, 34(9): 1208–1212 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133409.1208>

915 nm/974 nm单发射区半导体激光器光纤耦合模块设计

Design of 915 nm/974 nm Single-emitter Laser Diode Fiber-coupled Module
发光学报. 2018, 39(11): 1598–1603 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183911.1598>

GaAs基高功率半导体激光器单管耦合研究

Coupling Research of High Power Single GaAs Based Semiconductor Laser
发光学报. 2015(9): 1018–1021 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153609.1018>

文章编号: 1000-7032(2021)01-0104-07

多单管堆叠半导体激光器热分析及光纤耦合模拟仿真设计

王娇娇, 石琳琳*, 马晓辉, 张 贺, 李 岩, 李卫岩, 徐 莉

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 多单管合束技术是获得高输出功率密度半导体激光器的重要方法,但其存在封装方式单一、体积大等问题,难以满足更高功率密度和较好光束质量的需求。本文设计了一种多单管半导体激光器堆叠排布的封装结构,通过将多个单管半导体激光器垂直封装在辅助热沉之间,使得器件更加小型化,在充分利用单管半导体激光器优势的同时,既增加了单管半导体激光器的散热通道,又实现了在体积不增加的基础上提高输出功率。通过 ZEMAX 软件对 3 个单管进行了空间合束模拟,将光束耦合进芯径 200 μm 、数值孔径 0.22 的光纤中,可以达到 28.6 W 的激光输出,耦合效率为 95%。

关键词: 半导体激光器; 有限元分析; ZEMAX; 散热性能; 光纤耦合

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20200243

Thermal Analysis and Fiber Coupling Simulation Design of Multi-single Emitters Stacked Semiconductor Laser

WANG Jiao-jiao, SHI Lin-lin*, MA Xiao-hui, ZHANG He, LI Yan, LI Wei-yan, XU Li

(State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: linlinshi88@foxmail.com

Abstract: Multi-single diode laser emitters combination technology is an important method to obtain semiconductor lasers with high output power density. The difficulty of simplex packaging method and large volume restricts their application of high power and high optical quality. In this paper, a packaging structure with vertically stacked arrangement of multi-single emitters diode lasers is designed by vertically encapsulating single diode laser emitters between auxiliary heat sinks, making the device more miniaturization. This method can not only increase the heat dissipation channel of the single diode laser emitters, but also realize the improvement of output power without increasing the volume. In simulation, with ZEMAX optical design software, 3 single emitters diode lasers are coupled into a fiber with core diameter of 200 μm and NA of 0.22. The simulation results of the maximum output power of 28.6 W and the coupling efficiency of 95% were obtained.

Key words: semiconductor laser; finite element analysis; ZEMAX; heat dissipation; fiber coupling

收稿日期: 2020-08-14; 修订日期: 2020-09-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61804013,61804014); 长春理工大学青年基金(XQNJJ-2017-2)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61804013,61804014); Changchun University of Science and Technology Youth Science Foundation(XQNJJ-2017-2)

1 引 言

半导体激光器具有可靠性高、效率高、结构紧凑、波长范围宽、成本低等优良特性,被广泛应用于固态或光纤激光器泵浦源、医疗美容、加工制造、激光通信等领域^[1-5]。然而,传统的单管芯半导体激光器的输出功率不足以应用到许多高功率领域,因而通过合束技术来获得高功率、高亮度、高光束质量的半导体激光光源是目前的普遍手段^[6-7]。

单管半导体激光器具有寿命长、散热性能好、亮度高、无需光束整形、光束质量好、耦合效率高等优点,通过多单管光纤耦合后可以获得高亮度、高功率的激光输出^[8-10]。目前多单管半导体激光器多使用阶梯式热沉或反射镜等方式进行空间合束^[11]。德国 Direct Photonics Industrie 采用阶梯反射镜合束技术将 8 个单管半导体激光器合束耦合到芯径 100 μm 、数值孔径 0.15 的光纤中,准直合束效率为 95%,耦合效率大于 90%^[12]。美国 nLIGHT 公司采用垂直堆栈合束技术将每只单管半导体激光器快慢轴方向准直后直接输出,过程中不需要反射镜对光路进行转折,提高了合束效率^[13]。从上述研究现状来看,多单管半导体激光器空间合束技术相对比较成熟。然而,目前研究中采用的阶梯热沉封装方式可能会导致每一路光程差不同,若叠加单管半导体激光器过多会导致光斑大小呈线性变大。阶梯热沉的阶梯高度一般为 1 mm 左右,单管半导体激光器排放间距较大,使得耦合难度增加,且受透镜孔径的影响,整个光学耦合系统体积变大,从而限制了单管半导体激光器的使用数量。此外,采用阶梯热沉的封装方式对每个阶梯热沉的平行度有很高的要求,对后期加工工艺要求较高。合束过程中使用的反射镜也会在一定程度上降低光束质量和亮度,并且多个镜片或者光栅的使用也提高了加工难度和不稳定性。因此,如何改进半导体激光器的封装方式,使其在一定的封装体积下能够容纳更多的单管半导体激光器耦合进光纤且降低工艺的难度,使得多单管半导体激光器合束更加简单灵活,是本文研究的重点。

本文提出了一种多单管半导体激光器堆叠排布的封装结构,通过散热设计在单管半导体激光器的 N 面和 P 面焊接辅助热沉,在节省封装空间

的同时使得半导体激光器产生的热量可以双向传导,增加了散热通道。在实现有效的激光输出的同时,通过光学设计确定多单管半导体激光器堆叠所用的光学元件的数量。光束整形需要的光学元件相对较少,有效地降低了封装工艺难度,且与传统多单管半导体激光器封装结构相比,节省了空间,使得器件更加小型化。

2 封装结构设计

2.1 多单管堆叠结构热特性分析

半导体激光器的电光转换效率在 50% 左右,其他的注入功率则基本以热能的形式耗散掉。产生的废热会导致半导体激光器输出波长红移,输出功率降低,光电转换效率下降以及阈值电流增大等后果。因此,对半导体激光器来说散热特性的分析及设计尤为重要,将最终影响激光器的输出功率。在传统的多单管半导体激光器封装结构中,单管半导体激光器一般以 Cu 热沉高度差恒定的阶梯形式封装在基础热沉上,每个阶梯高度一般为 1 mm 左右,这种高度差增加了整个封装结构的体积。而且采用传统的封装方式将芯片平放焊装在热沉表面,该散热方式主要是通过热沉底部散热,散热方式比较单一。针对这两点,本文将单管半导体激光器垂直封装在两个辅助热沉之间,辅助热沉的高度固定,在不增加整体高度的同时,又可以使每个单管半导体激光器产生的热量通过 P 面和 N 面扩散。图 1 为多单管半导体激光器堆叠排布封装结构示意图。

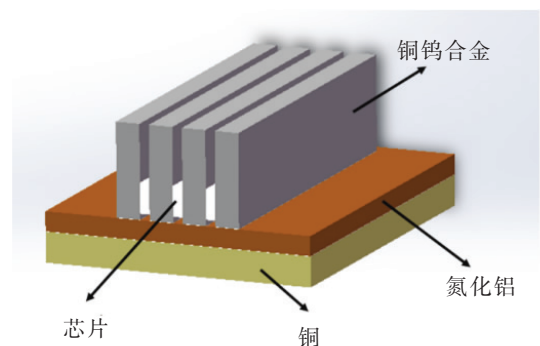


图 1 多单管半导体激光器堆叠排布封装结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of multi-single emitters stacked semiconductor laser package structure

对半导体激光器进行稳态热分析过程中,针对模型做了如下假设^[14-17]:在半导体激光器工作过程中,所产生的废热主要来自有源区内载流子的复合、吸收和自发辐射;在模拟过程中,由于单

管半导体激光器体积较小,与空气接触的激光器表面积相对较小,因此忽略激光器的空气对流散热和辐射散热;采用 COS(Chip on submount)封装方式,其热沉底面固定在制冷器上,模拟过程中将底部的温度设置为 298 K。该 COS 铜热沉的尺寸为 4.5 mm × 5.75 mm × 0.5 mm。

计算中所使用的半导体激光器光电参数为:

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

Material	Thermal conductivity/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Thickness/μm	Coefficient of thermal expansion/ (10 ⁻⁶ · K ⁻¹)
GaAs	55	150	6.4
ALN	180	325	4.5
Cu heat sink	398	500	18
WCu10	170	400	4.5

激光器有源区的温度对激光器的光电性能和寿命都有很大影响。激光器的热阻是衡量激光器散热性能的重要参数,反映了激光器的散热性能。半导体激光器热阻的表达式为:

$$R_{th} = \frac{T_j - T_0}{P_{tem}}, \quad (1)$$

连续条件下输出功率为 10 W,中心波长为 976 nm,电光转换效率为 50%,辅助热沉采用钨铜合金(WCu10),WCu10 热沉尺寸为 0.4 mm × 5.75 mm × 1.55 mm。其热膨胀系数与芯片相匹配,在封装过程中,能够减小芯片的残余应力,加工简单,价格适宜。模拟中所使用的材料参数如表 1 所示。

其中 T_j 为有源区温度, T_0 为热沉温度, P_{tem} 为热功率。半导体激光器的热阻主要与器件材料、结构、工艺及封装方式等因素有关^[18]。采用有限元软件 ANSYS 分别对单管半导体激光器数量 $N = 1, 2, 3$ 时的封装结构进行了热模拟,温度分布云图如图 2 所示。

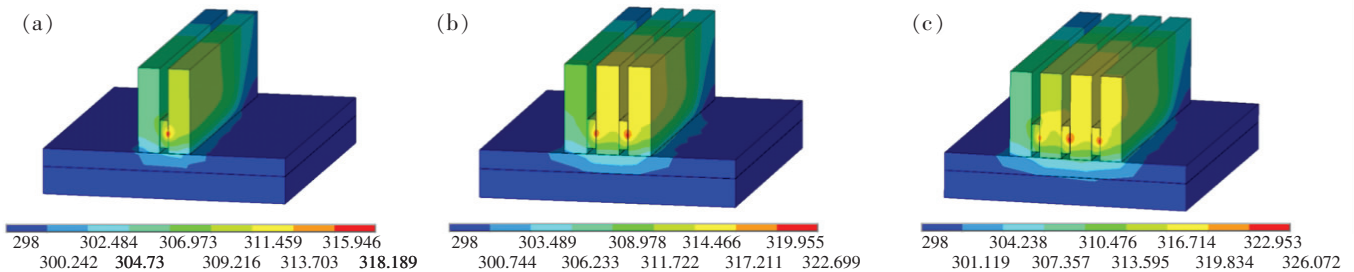


图 2 不同单管数量下封装结构的温度分布云图。(a) $N = 1$; (b) $N = 2$; (c) $N = 3$ 。

Fig. 2 Temperature distribution cloud diagram of package structure with different numbers of single emitters diode laser. (a) $N = 1$. (b) $N = 2$. (c) $N = 3$.

由图 2 可知,当单管半导体激光器数量 $N = 1$ 时,芯片有源区结温为 318.189 K,热阻 $R_{th1} = 2.02$ K/W。当单管半导体激光器数量 $N = 2$ 时,芯片结温增加到 322.699 K,热阻 R_{th2} 略有增加,为 2.47 K/W。当单管半导体激光器数量 $N = 3$ 时,结温增加到 326.072 K,热阻随之增加, $R_{th3} = 2.8$ K/W。由以上分析可知,虽然随着单管半导体激光器数量的增加,每个单管半导体激光器的结温有所升高,但在该温度范围内,单管半导体激光器仍能正常工作。且在每个 WCu 热沉高度固定的情况下,单管半导体激光器之间间距仅有 0.4 mm,实现了高密度封装。表明该结构能够在保障封装体积小型化的同时使更多数量单管半导体激光器出射的光经合束后耦合进光

纤,从而实现更高功率的激光输出。

2.2 多单管堆叠结构的 $P-I$ 特性分析

影响半导体激光器最终输出功率的一个重要因素是热阻。多单管半导体激光器封装可以实现较高输出功率,但是产生的热量也会影响到激光器的最终输出功率。通过对封装结构中接近失效时的每个单管的最大输出功率进行研究,可以分析出激光器的可靠性。对于半导体激光器,其输出功率与热阻的关系由下式表示:

$$P = \eta_{exp} \left[- \frac{R_{th}(IV - P)}{T_1} \right] \cdot \left\{ I - I_{Ret} \exp \left[\frac{R_{th}(IV - P)}{T_0} \right] \right\}, \quad (2)$$

其中 T_1 为激光器特征温度, T_0 为热沉温度, P 为激光器的输出功率, R_{th} 为热阻, V 为激光器偏置电压, I 为工作电流, η 为激光器的斜率效率, I_{Ret} 为阈值电流。

半导体激光器输出功率随电流变化的曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 激光器的热阻越小, 其最大输出功率越高。本文首先分析了在单管半导体激光器数量分别为 $N = 1, 2, 3$ 的封装结构中每个单管输出功率的变化。从图中可以看出, 当单管半导体激光器数量 $N = 1$ 时, 半导体激光器的热阻最小, 为 2.02 K/W , 其最大输出功率为 28.56 W 。在单管半导体激光器数量 $N = 2$ 的封装结构中, 每个单管半导体激光器的最大输出功率降低到 24.97 W 。在单管半导体激光器数量 $N = 3$ 的封装结构中, 总热阻有所提高, 每个单管半导体激光器的最大输出功率为 22.91 W 。这是由于单管半导体激光器之间间距较小, 会产生热串扰现象, 因此随着单管半导体激光器数量的增加, 其热阻会逐渐增大, 每个单管的最大输出功率随之减小。

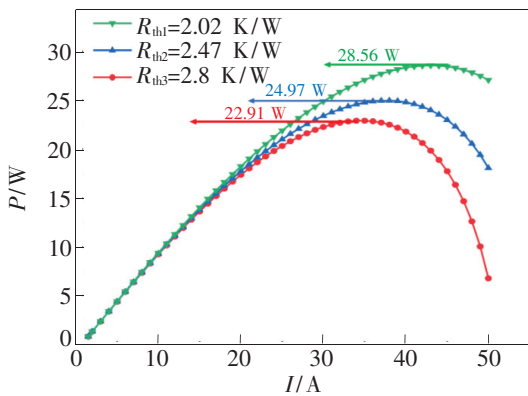


图 3 每个单管半导体激光器不同热阻下的 $P-I$ 特性曲线

Fig. 3 $P-I$ characteristic curve of each single emitter diode laser under different thermal resistance

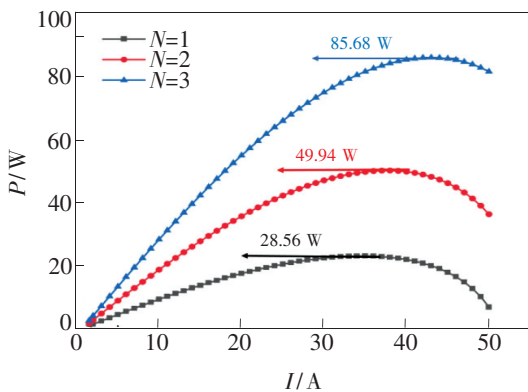


图 4 不同单管半导体激光器数量下的 $P-I$ 特性曲线
Fig. 4 $P-I$ characteristic curve with different number of single emitters diode laser

图 4 为在不同单管半导体激光器数量下封装结构总的最大输出功率曲线图。如图 4 所示, 虽然当封装 3 个单管时, 其中每一个单管的最大输出功率有所下降, 但是 3 个单管合并输出的总的最大输出功率相较于单管数量较少的封装结构来说是增加的, 在相同的输入电流前提下能得到更大的输出功率, 最大输出功率可达到 85.68 W 。由于多单管半导体激光器堆叠而产生的热串扰并没有给总输出功率造成太大影响。

3 光学设计与模拟

典型的半导体激光器在垂直于 PN 结(快轴)方向上发光宽度为 $1 \mu\text{m}$, 光束发散角一般为 $30^\circ \sim 60^\circ$; 平行于 PN 结(慢轴)方向上的发光宽度为 $100 \mu\text{m}$, 光束发散角一般为 $6^\circ \sim 12^\circ$ ^[18-19]。快慢轴光束质量相差较大, 这种具有严重像散和发散角的光束限制了半导体激光器的应用。因此, 在实际应用时需要将半导体激光器光束进行光束整形后再进行光纤耦合, 从而使半导体激光器能更广泛地应用于多个领域。

多单管叠阵由 3 个单管半导体激光器组成, 单管半导体激光器输出功率为 10 W , 单管半导体激光器之间的间距为 0.4 mm 。模拟采用腔长 4 mm 、中心波长 976 nm 的边发射半导体激光器, 具体参数如表 2 所示。

表 2 半导体激光器快慢轴参数

Tab. 2 Fast and slow axis parameters of semiconductor lasers

	d/mm	$\theta/(\text{^\circ})$
快轴方向	0.001	35
慢轴方向	0.1	8

首先采用芯径 $200 \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的裸石英光纤对快轴进行准直, 使用 ZEMAX 软件进行模拟, 准直后快轴发散角为 0.6° 。采用焦距为 6.08 mm 的柱透镜对慢轴进行准直, 准直后慢轴发散角为 1.2° 。经过快慢轴准直后的光斑图如图 5 所示。准直后快慢轴的光参数积(BPP)如表 3 所示。

采用焦距为 4.95 mm 的非球面镜对光束进行聚焦, 为了将聚焦后的光束耦合进芯径 $200 \mu\text{m}$ 的光纤中, 快慢轴的尺寸应小于 $141 \mu\text{m}$, 模拟聚焦后的光束在慢轴方向尺寸为 $110 \mu\text{m}$, 快轴方向尺寸为 $120 \mu\text{m}$, 如图 6 所示。光束入射角为 6.8° ,

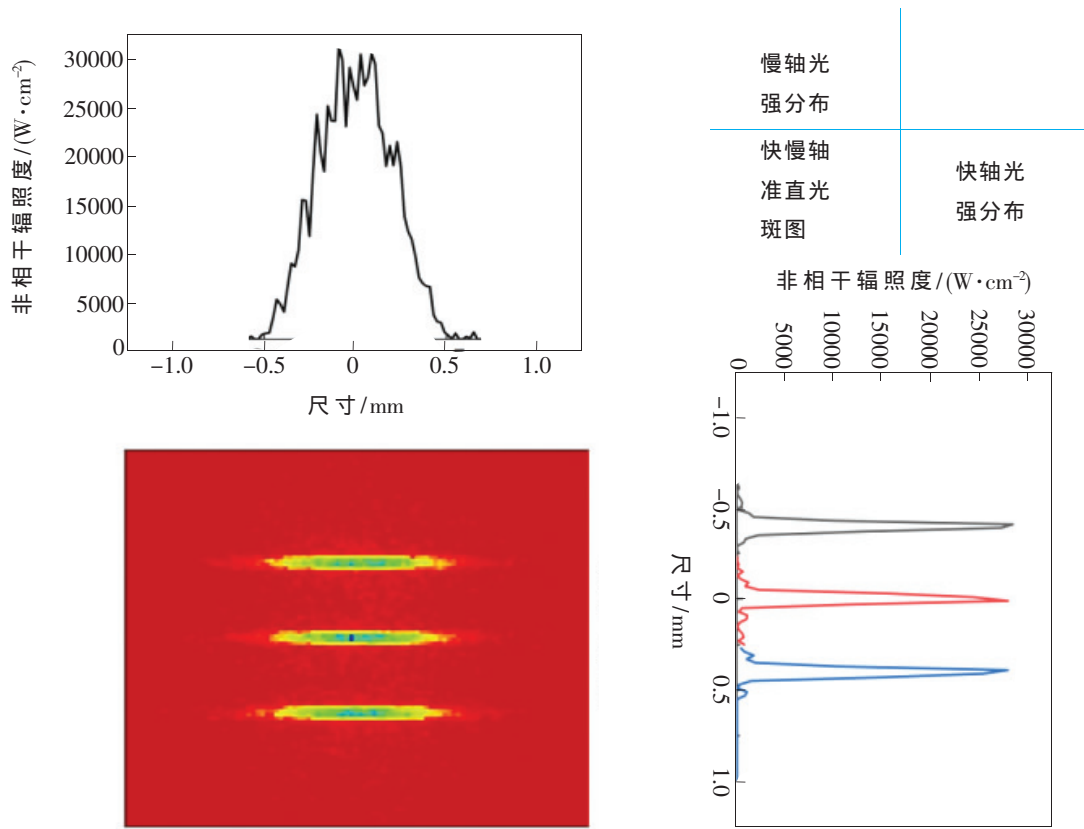


图 5 经快慢轴准直后的光斑图

Fig. 5 Spot diagram after collimation of fast axis and slow axis

表 3 单管半导体激光器准直前后参数

Tab. 3 Parameters of single emitters diode laser before and after collimation

	d/mm	$\theta/(\text{°})$	BPP/(mm · mrad)
快轴准直前	0.001	35	0.15
快轴准直后	0.1	0.6	0.26
慢轴准直前	0.1	8	3.5
慢轴准直后	1.2	1.2	6.3

角度小于数值孔径为 0.22 所能容纳的最大入射角度,满足光纤耦合条件,能够将 3 个边发射半导体激光器出射的光耦合进芯径 200 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤中。为了提高半导体激光器的光束质量和输出功率,目前采用的光束整形系统比较复杂且占用体积较大,相对于传统封装方式,采用多单管半导体激光器封装方式的光学设计更加简单,减少了透镜的使用数量,缩小了系统的整体光路,可以使得器件更加小型化。图 7 为准直快慢

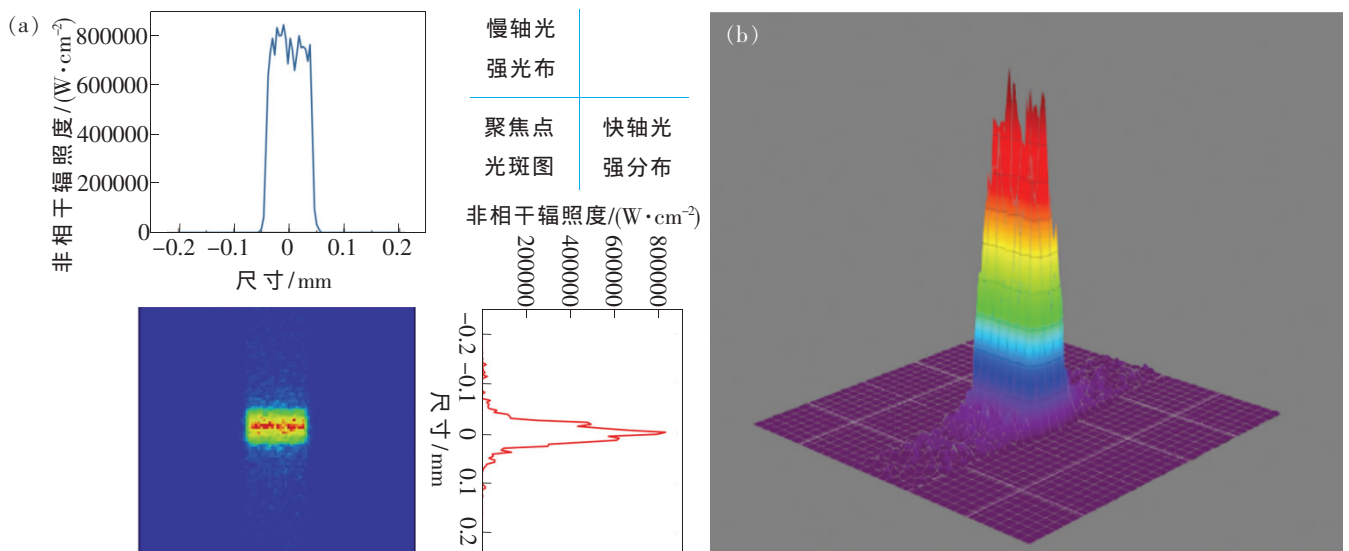


图 6 (a)聚焦点尺寸及光斑图;(b)光强分布三维图。

Fig. 6 (a) Focus point size and spot diagram. (b) Three-dimensional map of light intensity distribution.

轴光束及聚焦耦合过程,整体光路长 16 mm。光束经过光纤后输出的光斑图如图 8 所示,输出光功率为 28.6 W,系统的耦合效率为 95%。

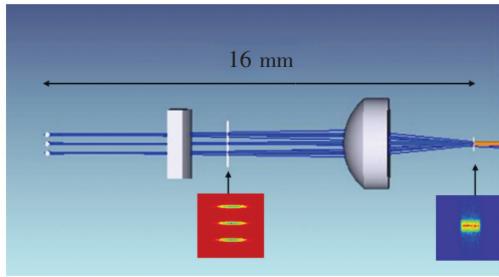


图7 准直快慢轴光束及聚焦耦合过程

Fig.7 Processes of collimate fast axis and slow axis beam and focusing coupling

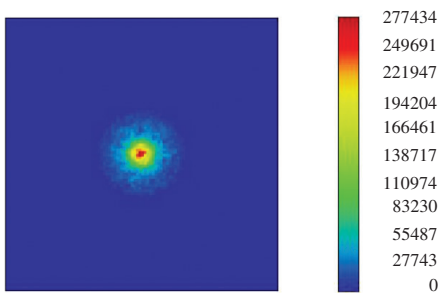


图8 光纤端面输出的光斑图

Fig.8 Output beam spec of fiber end face

4 结 论

为了提高半导体激光器的输出功率且节省封

装器件的使用空间,本文设计了一种多单管半导体激光器堆叠排布的封装结构。与传统的阶梯热沉封装结构相比,该结构通过将单管半导体激光器垂直排布封装在辅助热沉之间,在不增加整体高度的同时,可以使每个单管半导体激光器产生的热量通过 P 面和 N 面扩散,从而增加了半导体激光器的散热通道,且使得器件更加小型化。通过 ANSYS 分别模拟了单管半导体激光器数量 $N=1,2,3$ 时的芯片温度分布情况,结果表明使用该封装结构后芯片能正常工作,且当采用一个单管封装时,芯片结温为 318.189 K,其热阻最小为 2.02 K/W。通过 $P-I$ 特性曲线分析了在不同单管半导体激光器数量下封装结构的输出功率,当采用 3 个单管半导体激光器封装时,总的最大输出功率可达到 85.68 W。通过 ZEMAX 对多单管半导体激光器封装结构进行模拟,使用光纤及柱面镜对快慢轴准直,而后采用非球面镜将准直后的光束进行聚焦,最终耦合进芯径 200 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤中。模拟显示,系统输出光功率为 28.6 W,耦合效率为 95%。该结构设计能使半导体激光器在更小的设计空间实现较高的输出功率,而且空间的减小简化了耦合光路,使得器件更具有稳定性。

参 考 文 献:

- [1] 耿素杰,王琳. 半导体激光器及其在军事领域的应用 [J]. 激光与红外, 2003,33(4):311-312.
GENG S J, WANG L. The semiconductor laser and its applications in military [J]. *Laser Infrared*, 2003,33(4):311-312. (in Chinese)
- [2] 马骁宇,王俊,刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状 [J]. 红外与激光工程, 2008,37(2):189-194.
MA X Y, WANG J, LIU S P. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2008,37(2):189-194. (in Chinese)
- [3] 田锬,邹永刚,马晓辉,等. 面发射分布反馈半导体激光器 [J]. 中国光学, 2016,9(1):51-64.
TIAN K, ZOU Y G, MA X H, et al.. Surface emitting distributed feedback semiconductor lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2016, 9(1):51-64. (in Chinese)
- [4] 韩晓俊,李正佳,朱长虹. 半导体激光器在医学上的应用 [J]. 光学技术, 1998(2):7-10.
HAN X J, LI Z J, ZHU C H. Laser diode applied in medicine [J]. *Opt. Technol.*, 1998(2):7-10. (in Chinese)
- [5] 吴华玲,郭林辉,王昭,等. 基于双管的高亮度半导体激光器光纤耦合系统设计 [J]. 中国激光, 2016,43(10):1001012-1-7.
WU H L, GUO L H, WANG Z, et al.. Design of high brightness fiber-coupled diode laser system based on dual-emitters [J]. *Chin. J. Lasers*, 2016,43(10):1001012-1-7. (in Chinese)
- [6] 周泽鹏. 百瓦级高亮度半导体激光器光纤耦合设计 [D]. 长春:长春理工大学, 2014.
ZHOU Z P. *Fiber Coupling Design of Hundred-watt High Brightness Semiconductor Lasers* [D]. Changchun: Changchun

- University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] 郝明明,朱洪波,秦莉,等. 百瓦级高亮度光纤耦合半导体激光模块的研制 [J]. 发光学报, 2012,33(6):651-659.
HAO M M,ZHU H B,QIN L,*et al.*. Research on high brightness fiber coupled diode laser module with hundred watts class output power [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012,33(6):651-659. (in Chinese)
- [8] KARLSEN S R,PRICE R K,REYNOLDS M,*et al.*. 100-W 105- μm 0.15 NA fiber coupled laser diode module [C]. *Proceedings of SPIE 7198,High-power Diode Laser Technology and Applications VII*,San Jose, 2009:71980T-1-8.
- [9] HOU L B,ZHANG H,XU L,*et al.*. Design of high-brightness 976 nm fiber-coupled laser diodes based on ZEMAX [C]. *Proceedings of SPIE 9521,Selected Papers from Conferences of The Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics 2014,Part I*,Nanjing, 2015:95211F-1-8.
- [10] WANG B,ZHU J. Spectral beam combining of multi-single emitters [J]. *Proceedings of SPIE 9733,High-power Diode Laser Technology and Applications XIV*,San Francisco, 2016:97330F.
- [11] 谢文君,曹银花,许商瑞,等. 基于曲面空间合束的多单管半导体激光光纤耦合 [J]. 发光学报, 2018,39(9):1280-1284.
XIE W J,CAO Y H,XU S R,*et al.*. Fiber coupling of multi-single emitters diode lasers based on curved surface spatial combination [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(9):1280-1284. (in Chinese)
- [12] FRITSCH H,KRUSCHKE B,KOCH R,*et al.*. High brightness direct diode laser with kW output power [J]. *Proceedings of SPIE 8965,High-power Diode Laser Technology and Applications XII*,San Francisco, 2014:89650G-1-7.
- [13] FARMER J N,SCHULTE D E,YAN Y. Vertically displaced stack of multi-mode single emitter laser diodes; USA, 20090103580A1 [P]. 2009-04-23.
- [14] 王文,高欣,周泽鹏,等. 百瓦级多芯片半导体激光器稳态热分析 [J]. 红外与激光工程, 2014,43(5):1438-1443.
WANG W,GAO X,ZHOU Z P,*et al.*. Steady-state thermal analysis of hundred-watt semiconductor laser with multichip packaging [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2014,43(5):1438-1443. (in Chinese)
- [15] 杨宏宇,刘林,舒世立,等. 大功率半导体激光器有源区温度影响因素分析 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017,31(2):143-147.
YANG H Y,LIU L,SHU S L,*et al.*. Analysis on influencing factors of active region temperature of high power semiconductor laser module [J]. *J. Jiangsu Univ. Sci. Technol. (Nat. Sci. Ed.)*, 2017,31(2):143-147. (in Chinese)
- [16] 姜晓光,赵英杰,吴志全. 基于 ANSYS 半导体激光器热特性模拟与分析 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010,33(1):41-43.
JIANG X G,ZHAO Y J,WU Z Q. Thermal characteristic simulation and analysis of semiconductor laser based on ANSYS [J]. *J. Changchun Univ. Sci. Technol. (Nat. Sci. Ed.)*, 2010,33(1):41-43. (in Chinese)
- [17] 辛国锋,沈力,皮浩洋,等. 高功率半导体激光器热阻测量的实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2010,47(11):112501-1-5.
XIN G F,SHEN L,PI H Y,*et al.*. Experimental study of thermal resistance measurement for high power laser diode array [J]. *Laser Optoelect. Prog.*, 2010,47(11):112501-1-5. (in Chinese)
- [18] WU Y L,DONG Z Y,CHEN Y Q,*et al.*. Beam shaping for kilowatt fiber-coupled diode lasers by using one-step beam cutting-rotating of prisms [J]. *Appl. Opt.*, 2016,55(34):9769-9773.
- [19] 于贺,马晓辉,赵鑫,等. 基于半导体激光器堆栈的光纤耦合技术 [J]. 中国激光, 2017,44(11):1101006-1-6.
YU H,MA X H,ZHAO X,*et al.*. Fiber coupling technology based on diode laser stack [J]. *Chin. J. Lasers*, 2017,44(11):1101006-1-6. (in Chinese)



王娇娇(1995 -),女,山东聊城人,硕士研究生,2018年于潍坊学院获得学士学位,主要从事半导体激光器的研究。
E-mail: 2798298773@qq.com



石琳琳(1988 -),女,吉林长春人,博士,助理研究员,2016年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体激光器物理与技术的研究。
E-mail: linlinshi88@foxmail.com