

基于半导体激光合束技术的高功率加热光源

韩金樑^{1,2}, 张俊^{1*}, 单肖楠¹, 秦莉¹, 王立军¹¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 随着合束技术的发展以及单元芯片功率的提升, 半导体激光器在激光加工领域越来越彰显自身的优势。针对激光加工领域中玻璃纤维筋材热固化的需求, 采用 18 W 单管激光器作为单元模块, 通过空间合束、偏振合束, 以及光束整形技术, 获得了输出功率大于 2 kW、波长 915 nm、光斑尺寸为 700 mm×10 mm 的半导体激光加热光源, 满足该领域对高功率、长光斑激光加热的需求。

关键词 激光光学; 半导体激光器; 光束整形; 玻璃纤维筋材; 热固化; 激光加热

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2214001

High Power Heating Light Source Based on Semiconductor Laser Beam Combintion Technology

Han Jinliang^{1,2}, Zhang Jun^{1*}, Shan Xiaonan¹, Qin Li¹, Wang Lijun¹¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract With the development of beam combining and the improvement of unit chip power, diode lasers have shown their own advantages in the field of laser processing. Aiming at the requirement of thermal curing of glass fiber reinforcement bars in the field of laser processing, the single tube laser with the power of 18 W is used as the unit module. The laser heating light source with the output power of greater than 2 kW, the wavelength of 915 nm, and the spot size of 700 mm×10 mm is obtained through the combination of spatial multiplexing, polarization multiplexing, and beam shaping technology, which meets the requirement of high power and long spot laser heating in industry.

Key words laser optics; diode laser; beam shaping; glass fiber reinforcement bars; thermal curing; laser heating

OCIS codes 140.2020; 140.3298; 230.3670

1 引言

玻璃纤维筋材是由高性能纤维与合成树脂基体再配合固化剂, 通过适当的成型工艺最终形成的材料。由于其质量小、强度高、耐腐蚀、抗磁性等特点^[1-4], 已经广泛地应用于交通轨道、大型桥梁、水利

工程等领域^[5-7], 是目前使用最广泛的复合材料之一。

玻璃纤维筋材的热固化常用方法是隧道炉热加工, 该方案尚存在以下问题: 其热量从表面传入材料内部, 速度慢, 材料固化同步性差, 导致固化后筋材强度受到影响; 隧道炉内装有加热管, 采用 360° 投射方式, 能量利用率差; 此外, 隧道炉需要放置在至

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-05-04; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61991433)、中科院先导科技专项(XDB43030302)、关键技术攻关(2006ZYGG0304)、吉林省科技发展计划(20190302042GX)、广东省重点领域研发计划(2020B090922003)

通信作者: *724644513@qq.com

少数十平方米的空间中工作,尺寸较大。

半导体激光器作为加热光源可以很好地解决上述问题。915 nm 半导体激光属于近红外激光,照射到材料上投射深度大,筋材从内部到表面几乎同时升温,而且,激光照射属于定向投射,能量利用率高,半导体激光器还具有体积小、重量轻、电光转换效率高^[8-9]等突出优势,因此可以解决隧道炉加热效率低、能量利用率差和空间要求大等问题。

本文针对国内工业领域对于玻璃纤维筋材热固化的需求,通过空间合束、偏振合束^[10]以及光束整形技术相结合的方法,研制出直接输出 2 kW、长尺寸光斑的半导体激光加热光源,满足该领域对于高功率、长光斑光源的需求,目前尚未有相关报道。

2 实验原理及设计

本文采用单管激光器作为单元器件(主要参数见表 1),通过整形以及合束技术,获得高功率激光输出。与采用线阵以及叠阵激光器方案相比,单管激光器方案的优点是单元激光器彼此间无热串扰的影响,因此工作可靠性高,且采用传导冷却的散热方式,对冷却水的水质无特殊要求,特别适合在工业领域中应用。采用尺寸 5.75 mm×4.5 mm×0.5 mm、高导热系数 230 W/(m·K)的氮化铝(ALN)材料为热沉对单管激光器贴片后进行散热,再结合焊接温

度高达 245 °C 的锡银铜焊片通过真空回流炉将单管热沉焊接到散热壳体上,从而提高芯片出光寿命。此外,单管激光器合束后光斑尺寸较小,更加有利于通过简单的光学系统进行后续光束整形,从而获得长尺寸光斑。

表 1 单管激光器的主要参数

Table 1 Main parameters of single tube laser

| Parameter | Specification |
|--|---------------|
| Output power /W | 18 |
| Operating current /A | 20 |
| Operating voltage /V | 1.85 |
| Slow axis divergence angle /($^{\circ}$) | 11.5 |
| Fast axis divergence angle /($^{\circ}$) | 58 |
| Emitter width / μ m | 190 |

由于半导体激光器快慢轴发散角很大,快轴发散角通常为 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$,慢轴发散角为 $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$,因此需要利用快轴准直镜(FAC)以及慢轴准直镜(SAC)分别对快慢轴方向的光斑进行整形,从而减小光束发散角,便于后续的空间合束以及偏振合束^[11-12]。

FAC 选用焦距为 0.3 mm 的非球面柱透镜,慢轴方向发散角相对较小,因此 SAC 采用焦距为 20 mm 的球面柱透镜。通过 Zemax 软件进行模拟,得到的模拟结果如图 1 所示。快慢轴准直后,单管激光器的快慢轴发散角模拟值分别为 6 mrad (95%)和 10 mrad(95%)。

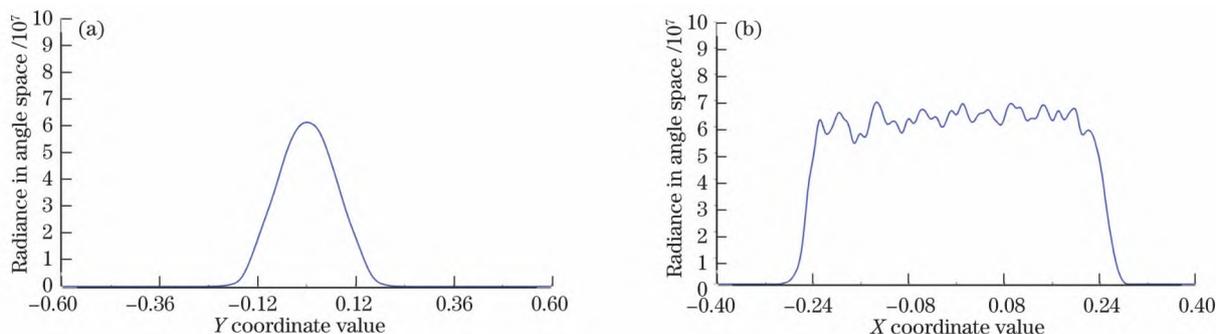


图 1 单管激光器准直后。(a)快轴发散角;(b)慢轴发散角

Fig. 1 Divergence angle of single tube laser after collimation. (a) Fast axis divergence angle ;

(b) slow axis divergence angle

为了获得高功率激光输出,采用空间合束和偏振合束技术将多个单管激光器进行组合。如图 2 所示,通过 Zemax 软件对光路进行模拟分析,采用 7 个单管激光器为一组,先通过空间合束在快轴方向将光束重排,阶梯间距为 0.4 mm,纵向光斑尺寸为 2.8 mm,横向光斑尺寸为 4 mm,再通过偏振合束技术,采用“半波片+偏振分光棱镜(PBS)^[13]”组合的方式将光斑与另外 7 个单管激光器的合束光斑整合

到一起,在不影响光束质量的前提下功率密度提高一倍。所采用的激光模块由 14 个单管组成,其中单管功率为 18 W,14 个单管总功率为 252 W。通过图 3 (a)模拟结果可以看出,考虑镀膜损耗以及光场分布,7 个单管激光器通过快慢轴准直以及反射镜空间合束后,模拟得到的功率为 122.8 W,合束效率约为 97%;通过图 3(b)模拟结果可以看出,2 组激光再通过偏振合束后,模拟得到的功率为 239.3 W,从单管

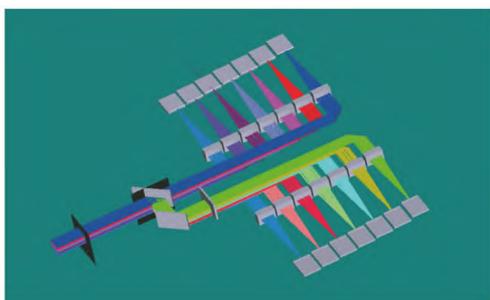


图 2 合束结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the beam combination structure

输出到合束后光光转换效率约为 95%。

激光加热玻璃纤维筋材需要加热部分的光斑尺寸较大。一种方案是激光器直接输出激光,该方案优点是可靠性高,缺点是得到的矩形光斑其长度会严重不足,进一步增加光斑长度难度较大。另一种方案是光纤耦合输出,激光束光纤输出后通过振镜扫描,获得扫描激光束,该方案优点是可以通过振镜扫描获得的激光束长度范围明显加大,但对振镜所能承受的功率阈值较大,无论是从成本还是可靠性考虑都存在较大风险。

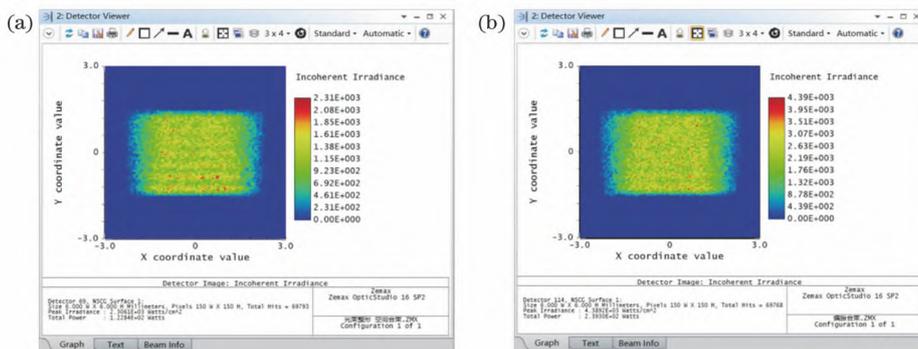


图 3 模拟结果。(a)光束整形及空间合束后光功率;(b)偏振合束后光功率

Fig. 3 Simulation result. (a) Optical power after beam shaping and spatial combining; (b) optical power after polarization combining

本文中加热激光器采用的是直接输出的方案,通过空间合束直接获得高功率、长尺寸的光斑。以上述合束后输出功率约 239 W 的激光器为单元模块进行光束整形与光束拼接,激光器整机结构设计如图 4 所示,在水平方向放置 3 台单元模块,再通过平凹柱透镜将水平方向的光斑进行扩束,平凹柱透镜的曲率为 R3.3、材料为 H-K9L,因此在距离激光器出光口 1 m 处可以获得长度为 700 mm 的光斑,并且随着距离的增加,光斑尺寸进一步增加,便于应用在更大尺寸加热要求的情况下。本文设计的激光器每一层在距离出光口 1 m 处都可以获得

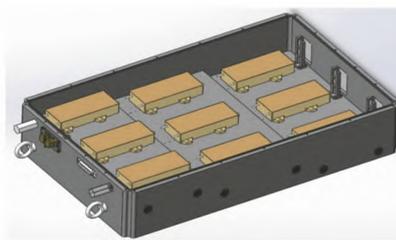


图 4 整机结构示意图

Fig. 4 Diagram of the whole structure

700 mm×10 mm 的长条形方光斑。扩束前和扩束后的光斑仿真结果如图 5 所示,扩束后光斑的水平和竖直方向的尺寸仿真结果如图 6 所示。

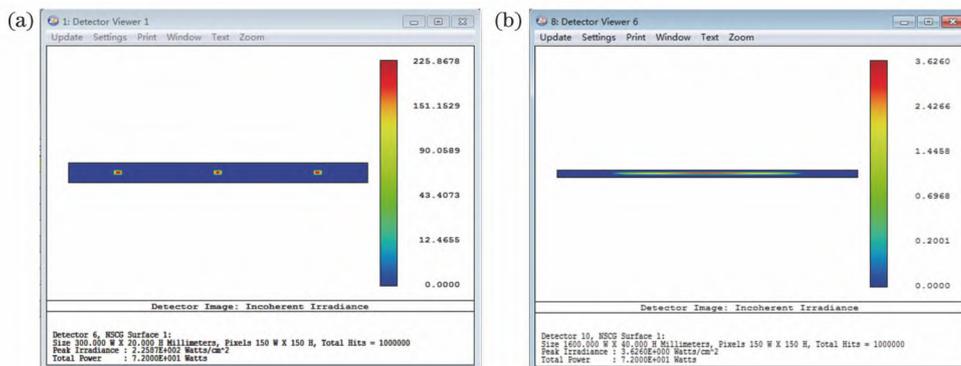


图 5 光斑分布图。(a)扩束前;(b)扩束后

Fig. 5 Spot distributions. (a) Before beam expanding; (b) after beam expanding

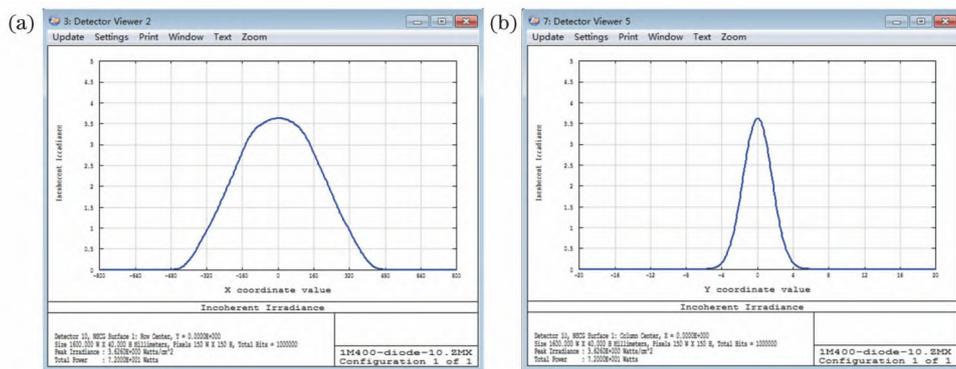


图 6 扩束后光斑尺寸。(a)水平方向;(b)竖直方向

Fig. 6 Spot size after beam expanding. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

竖直方向可以根据需求的尺寸,阶梯放置激光器,该方向不做整形,可以得到光斑尺寸为 $700\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的三条长光斑。实际加热应用中考虑加热的效率以及固化的效果,通常要从多个方向同时进行照射,如图 7 所示,在外光路加工材料后端放置两个夹角 120° 的反射镜,这样可以将上述的三束光以三个方向投射到材料上,从而获得更好的加热效果。此外,理论上由于光程的因素,三条光斑直接照射到材料上光斑长度会略有不同,导致加热长度以及光功率密度存在差别,通过外光路反射镜可以对单路激光光程进行调节,使得三条光斑获得

很好的一致性,仿真结果如图 8 所示。

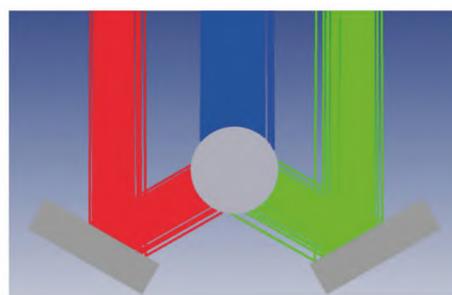


图 7 激光照射材料示意图

Fig. 7 Diagram of laser heating material

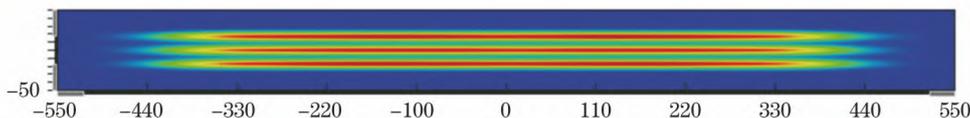


图 8 反射镜调节后光斑分布示意图

Fig. 8 Spot distribution after mirror adjustment

3 实验结果与分析

本文所设计的加热直接输出半导体激光器如图 9 所示,所用水冷机的制冷量为 3000 W ,冷却液温度为 $22\text{ }^\circ\text{C}$,流量为 15 L/min ,整机光源在驱动电流

$0\sim 18\text{ A}$ 范围内调节,记录电流、电压、功率值,绘制成 $P-I-V$ 曲线,如图 10 所示。在驱动电流为 18 A 时,电压为 225 V ,输出功率为 2123 W 。近场及远场光斑如图 11 所示,图 11(b)为在照射距离 1 m 处



图 9 激光加热光源实物图

Fig. 9 Photograph of laser heating light source

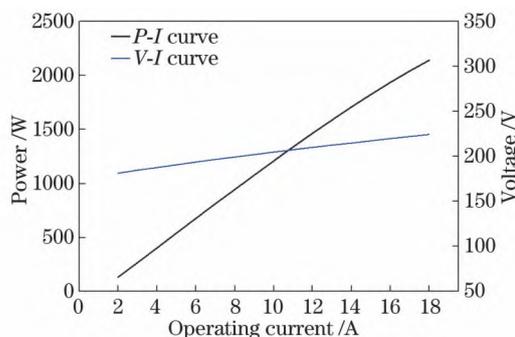


图 10 $P-I-V$ 曲线图

Fig. 10 $P-I-V$ curves

的光斑图,最上层光斑达到 $700\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,而中层和下层长度方向略短,主要是因为内置的激光器放置位置存在光程的差别,最上层光程长因此光束传输距离长,光斑也相应长;同理,中层和下层光程

相对短,传输距离短,因此光斑短。该现象对实际应用不会产生影响,出光后通过外光路反射镜调整相应光路使得光程相同即可使照射到材料表面的光斑长度相同。

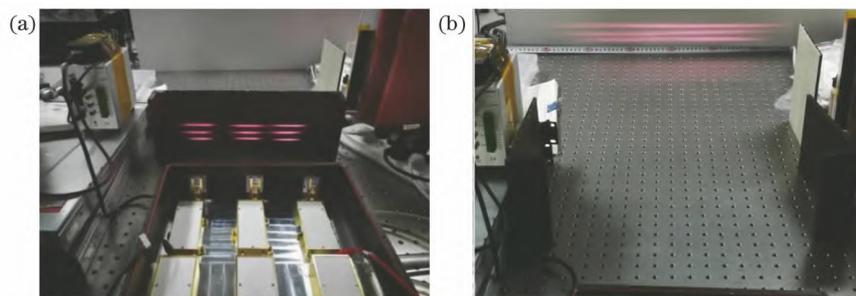


图 11 光斑图。(a)近场;(b)远场

Fig. 11 Beam spots. (a) Near field; (b) far field

本文采用工业领域最常用的波长 915 nm 的单管激光器,单路工作电压 1.8 V ,工作电流 18 A ,输出功率 18 W 。14 路单管激光器通过空间合束和偏振合束后,在驱动电路 18 A 、测试电压为 25 V 时,输出功率达到 238 W ,实际合束后效率为 94.5% 。合束后功率比理论值低主要有四方面原因:1)空间合束过程中,阶梯高度为 0.4 mm ,在实际装调过程中存在层与层少部分边缘光被遮挡的问题;2)光路中的光学镜片都镀有增透介质膜,透过率为 $99\%\sim 99.8\%$,因此存在一定的损耗;3)芯片自身的线偏振度达不到 100% 横电(TE)偏振或横磁(TM)偏振,通常偏振度为 $95\%\sim 98\%$;4)偏振合束过程中,TE 偏振或者 TM 偏振以 45° 角入射,对比理想情况以布儒斯特角入射,存在一定的角度误差,因此会产生损耗。

上述几个过程累计在一起,因此实际出光功率会比理想出光功率略低。

4 结 论

本文通过空间合束、偏振合束、光束整形技术,研制出了输出功率大于 2 kW 、光斑尺寸为 $700\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的长光斑半导体激光加热光源。该激光器具有体积小、功率高、光斑长度大以及光束便于调节等特点,适合直接应用于玻璃纤维筋材的热固化。下一步将通过实际加工效果,进一步提高半导体激光器的输出功率以及优化光斑尺寸,从而扩展其在该领域的应用。

参 考 文 献

- [1] Zhang X C, Qian J, Liu J, et al. Recent process in laser processing of fiber-reinforced composites [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111432.
- [2] 张学聪, 钱静, 刘军, 等. 激光加工纤维增强复合材料研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111432.
- [3] Czapski P, Jakubczak P, Zgórnjak P, et al. Influence of manufacturing technique and autoclaving curing rate on the non-linear behaviour of thin-walled, GFRP channel columns-experimental studies [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107076.
- [4] Parandoush P, Lin D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites [J]. *Composite Structures*, 2017, 182: 36-53.
- [5] Li K X, Yi X J, Yin Y, et al. Discussion on the application of glass fiber in subway[J]. *Development Guide to Building Materials*, 2019, 17(4): 33-35.
- [6] 李可新, 衣晓婧, 殷月, 等. 浅谈玻璃纤维筋在地铁中的应用[J]. *建材发展导向*, 2019, 17(4): 33-35.
- [7] Wang Y L. Study on the application of glass fiber bar in a shield section project of subway[J]. *Technology Innovation and Application*, 2020(17): 175-177.
- [8] 王余良. 玻璃纤维筋在地铁某盾构区间工程中的应用研究[J]. *科技创新与应用*, 2020(17): 175-177.
- [9] Zhou J S. Design and application of glass fiber reinforcement in bridge engineering[J]. *Tunnels and Rail Transit*, 2018(1): 47-49, 57.
- [10] 周加生. 玻璃纤维筋在桥梁工程中的设计与应用[J]. *隧道与轨道交通*, 2018(1): 47-49, 57.
- [11] Wei S, Li L Q, Dong J J, et al. Study on the application of glass fiber bars in railway station reconstruction project [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2020(34): 153-154.
- [12] 魏森, 黎良青, 董俊杰, 等. 玻璃纤维筋在火车站改造项目中的应用研究[J]. *科学技术创新*, 2020(34): 153-154.

- 153-154.
- [8] Roland D. High-power diode lasers, fundamentals, technology, applications [M]. Berlin: Springer, 2000.
- [9] Price K, Karlsen S, Leisher P, et al. High-brightness fiber-coupled pump laser development[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7583: 758308.
- [10] Hao M M, Qin L, Zhu H B, et al. High power 976 nm fiber coupled module based on diode laser short bars [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 895-903.
郝明明, 秦莉, 朱洪波, 等. 基于半导体激光短阵列的 976 nm 高功率光纤耦合模块[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 895-903.
- [11] Stefan H, Haro F, Kruschke B, et al. Compact high brightness diode laser emitting 500 W from a 100 μm fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8605: 86050Q.
- [12] Karlsen S R, Price R K, Reynolds M, et al. 100 W 105 μm 0.15 NA fiber coupled laser diode module [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7198: 71980T.
- [13] Lin X C, Lin G Y, Zhao P F, et al. Generation of high brightness diode laser by using spectral and polarization beam combination [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 116: 219-223.