

10 kW 级直接输出半导体激光熔覆光源的 研制与热效应分析

林星辰^{1,2}, 张亚维¹, 朱洪波^{1*}, 刘云¹, 秦莉¹, 宁永强¹, 王立军¹

(1.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.哈尔滨工程大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对目前工业领域对激光熔覆、激光热处理的应用需求, 研制了 10 kW 级直接输出半导体激光熔覆光源。采用半导体激光叠阵为单元器件, 将偏振合成技术和波长合成技术相结合, 将 2 只 915 nm 和 2 只 976 nm 半导体激光叠阵进行合成, 当工作电流为 122 A 时, 最大输出功率达到 10 200 W, 电-光转换效率为 46%。实验中还对光源内部的易损光学元件的热效应进行了模拟分析并设计有效的散热结构, 使其最高温度从 442.2 K 下降到 320 K, 同时对应的热应力从 75.4 MPa 下降到 14 MPa, 大幅提升了激光光源的可靠性。

关键词: 半导体激光器; 激光熔覆; 激光合成

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A doi: 10.3788/CO.20191204.0820

10 kW CW diode laser cladding source and thermal effect

LIN Xing-chen^{1,2}, ZHANG Ya-wei¹, ZHU hong-bo^{1*},

LIU Yun¹, QIN Li¹, NING Yong-qiang¹, WANG Li-jun¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: zhbciomp@163.com

Abstract: Aiming at satisfying demands in applications of laser cladding and heat treatment, a source for diode lasers with a continuous output power of 10 kW was developed. By taking diode laser stack as unit device, two diode laser stacks of 915 nm and two of 976 nm were utilized and combined using polarization combination and wavelength combination technology. At an input current of 122 A, the maximum output power and the total electrical-optical conversion efficiency of this laser cladding source were 10 200 W and 46%, respectively. The thermal effect of key optical elements in the laser source was analyzed and an efficient thermal dissipation structure was designed. The maximum temperature of the lens decreased from 442.2 K to 320 K and the corresponding maximum von Mises stress reduced from 75.4 MPa to 14 MPa. This greatly improved the reliability of the laser source.

Key words: diode laser; laser cladding; laser combination

收稿日期: 2018-03-25; 修订日期: 2018-04-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2017YFB1104400)

Supported by National Key Research and Development Program of China(No.2017YFB1104400)

1 引言

由于半导体激光器具有电光转换效率高、可靠性高、免维护等优点^[1-4],其在激光加工领域得到越来越广泛的应用^[5-6]。尤其是在电光转化效率方面,半导体激光器的优势更加明显。半导体激光器的电光转换效率是 CO₂激光器的 4~5 倍,是全固态激光器的 3~4 倍^[7-10]。此外,通常大功率半导体激光器的发射波长为 800~1 000 nm,各种金属材料在此波段材料具有较高的吸收率,铝的吸收率为 13.5%,铁的吸收率为 33%,分别是 CO₂激光器 10.6 μm 波段处吸收率的 9 倍和 5 倍,因此大功率连续输出半导体激光加工光源成为了国际上的研究热点。Stephen Brookshier 等人采用半导体激光叠阵进行空间合成,研制出波长为 976 nm、连续输出功率达 8 kW 的半导体激光加工光源,电光转换效率为 45%^[11]。Baumann 等人通过对半导体激光叠阵进行光束整形,并对其波长合成,研制出输出功率为 10 kW 的半导体激光光源,电光转换效率为 50%,光源采用光纤进行传输,通过对加工头的光学模组进行调节,可以实现 2~5 mm 不同直径范围的多种光斑输出^[12]。在上述的研究工作中,研究重点都集中在半导体激光光源的设计与研制上,并没有对 10 kW 级的半导体激光加工光源热效应进行分析及论述。在功率如此大的激光光源内,过大的热效应有可能造成光源内部的光学元件基体的破裂及膜层的损伤,从而影响整个光源的可靠性^[13-14],因此对 10 kW 级半导体激光光源热管理技术的研究尤显重要。

本文以半导体激光叠阵为单元器件,采用偏振合成技术和波长合成技术相结合,将 2 只 915 nm 和 2 只 976 nm 半导体激光叠阵进行合成,研制出了万瓦级半导体激光器。实验中还对光源内部的易损光学元件的热效应进行了模拟分析并设计有效的散热结构,使其最高温度从 442.2 K 下降到 320 K,同时对应的热应力从 75.4 MPa 下降到 14 MPa,大幅提升了激光光源的可靠性。采用热分析对光源内部的易损光学元件进行了模拟,并采用自行设计的冷却系统对其进行冷却,从而

减小光学元件的热应力,有效提升了半导体激光光源的可靠性。

2 实验设计

2.1 光学设计

半导体激光叠阵是由多个激光 bar 条组成,以二维面阵结构实现激光输出,因此能够产生千瓦级的功率输出,在大功率半导体激光熔覆光源的研制中,主要采用叠阵作为单元光源^[15]。实验中采用 915 nm 和 976 nm 半导体激光叠阵进行合成,每个叠阵有 25 层 bar 条,每个 bar 条在 122 A 注入电流下的输出功率可达 110 W。由于半导体激光快慢轴方向发散角较大,通常为 70°×9°(95%能量分布),因此首先采用快轴准直镜对叠阵中每层 bar 条进行光束准直,实验中采用 LIMO 公司的快轴准直镜,型号为 FAC850,有效焦距为 0.9 mm。由于 bar 条的填充因子为 50%,每个发光点之间只有 200 μm 的间距,而目前商用的慢轴准直微透镜阵列周期均为 500 μm,无法对本 bar 条进行准直,因此在本工作中,采用自行设计的 200 mm 焦距的柱面镜对慢轴进行准直。通过准直后,快轴和慢轴的发散角分别降至 7 mrad 和 54 mrad(95%能量分布)。随后将同一波长的半导体激光器通过偏振合成镜进行合成,利用半波片将其中一路半导体激光的偏振态旋转 90°,两路激光束偏振态相差 90°的激光通过偏振合成镜时,P 光发生透射,S 光发生反射,这样就实现了偏振合成。将两个波长的叠阵都经过偏振合成后,再采用波长合成技术对两个波长的光束进行合成。波长合成是提升半导体激光光源功率输出的一种有效手段,通常采用二色分光镜实现两个不同波长的激光合成。实验中两个波长的半导体激光叠阵的波长间隔为 60 nm,波长合成主要使二色分光镜的透射曲线的过渡区准确位于两束激光波长间隔的中间,这样 915 nm 的激光将发生反射,976 nm 的激光将发生透射,从而实现波长合成,整个激光合成结构如图 1 所示。图 2 为所用的二色分光镜的膜系曲线。

根据实际应用中对激光加工的要求,本文设计了 300 mm 的聚焦镜组,由于半导体激光器准

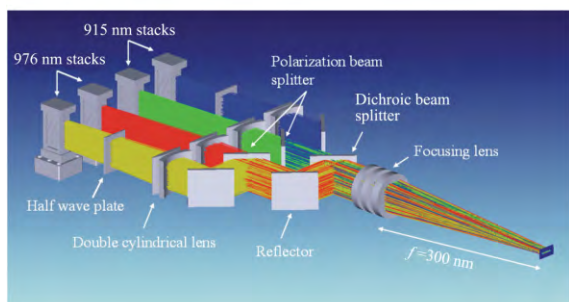


图 1 半导体激光器光路合成模型图

Fig.1 Optical path combination model of diode laser

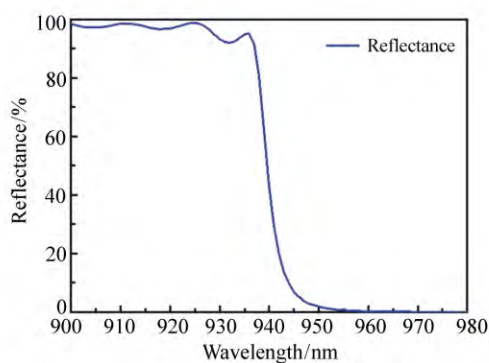


图 2 二色分光镜的膜系曲线

Fig.2 Coating curve of dichroic beam splitter

直后快慢轴发散角不同,因此通过计算,理论上聚焦光斑尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$,呈矩形分布,可以满足激光熔覆快速大面积加工的要求。

2.2 热效应分析

由于半导体激光光源的输出功率达 10 kW ,因此有必要对光源的热效应进行分析。半导体激光叠阵通常采用成熟的微通道冷却散热技术,因此本文主要讨论光源内部的光学元件的散热^[16-17]。

在如此高的激光功率密度下,透镜的温度会因为热吸收而显著上升,并在镜子表面产生温度梯度变化。温度梯度会引起热应力,导致透镜破裂。在光源内部所有光学元件中,聚焦镜组中最后一块透镜承受的功率密度最高,本文将对此进行详细讨论。本文采用 COMSOL 有限元分析软件对透镜的热应力进行模拟分析,透镜的基底材料熔石英对半导体激光器的吸收系数 α 为 0.05 m^{-1} ,熔石英的热导率为 $1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。公式

(1) 为热源方程:

$$q(x, y, z) = \frac{P\alpha}{S} e^{-\alpha z}, \quad (1)$$

其中 P 代表合成后激光光源输出的总功率, S 代表激光束在透镜上的辐射面积, z 为透镜的厚度。在自由传导散热条件下,在 COMSOL 中将自由传导系数设为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,将环境温度设为 293 K 。图 3 为模拟结果,可见透镜上的最大温度达到 442.2 K ,最大热应力(冯·米塞斯应力)超过 75.4 MPa ,这将导致透镜的破裂。为了减小热应力,保证激光光源的稳定性,设计了具有水冷结构的聚焦镜筒。如图 4 所示,在聚焦镜筒的侧壁上设计了多个直径为 3 mm 的水冷通道,水冷通道呈等间距分布。冷却水从注水口通入,然后通过环形通道后分别进入水冷通道,最后再汇集到一起从出水口流出,从而使透镜的热量随冷却水的流动被有效带走。可以看出水冷通道的数量对透镜的热应力有很大的影响。

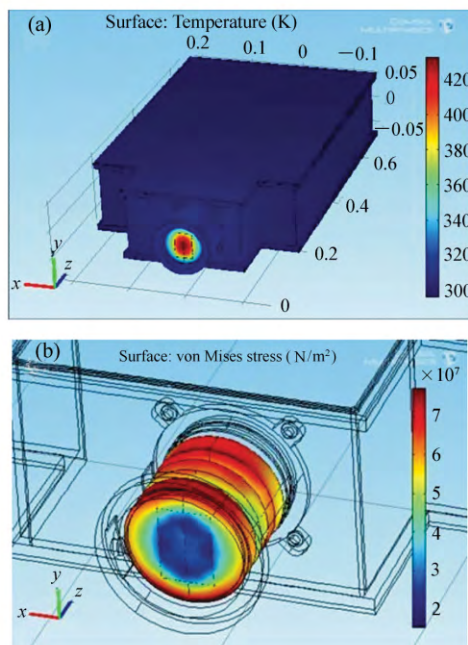


图 3 自由传导散热时镜头温度和热应力的模拟结果图

Fig.3 Simulations of temperature and thermal stress distribution under free conduction thermal dissipation

图 5 为透镜的温度和热应力随水冷通道数量

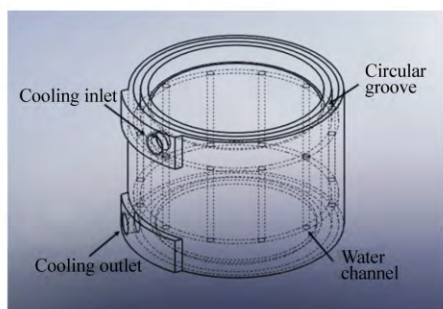


图4 聚焦镜筒的散热结构图

Fig.4 Thermal dissipation structure of focusing lens holder

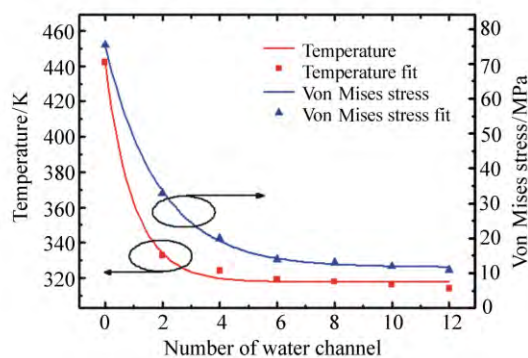


图5 冷却水通道数量与温度和热应力的关系图

Fig.5 Temperature and thermal stress varying with water channels

的变化情况。当水流量设置为 5 L/min, 温度设为 293 K, 通过判定雷诺数, 采用湍流模式模拟冷却水, 通过流体计算得出模拟结果, 如图 6 所示。随着水冷通道数量的增加, 温度和热应力在开始阶段快速下降, 当数量超过 6 个以后, 聚焦镜筒的散热能力趋于饱和, 此时, 再增加水冷通道数量对透镜温度及热应力的影响并不大。将水冷通道数量设为 6 个并对透镜的热效应进行模拟, 透镜的最高温度从 442.2 K 降至 320 K, 相应的热应力从 75.4 MPa 降至 14 MPa, 热效应明显下降。

3 结果分析

如上文 2.1 中所述, 通过偏振合成和波长合成相结合的方法, 4 只半导体激光叠阵实现了功率合成。整个激光光源采用水冷方式进行冷却, 水冷温度设为 293 K, 功率和效率随电流的变化

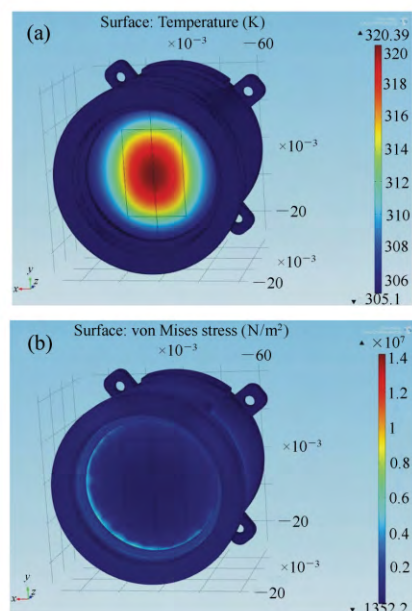


图6 6个水冷通道下聚焦镜筒的温度和热应力分布图

Fig.6 Temperature and thermal stress distribution of focusing lens holder with six water channels

曲线如图 7 所示。在输入电流为 122 A 下, 整个激光光源的输出功率可达 10 120 W, 电光转换效率达 46%。从图 7 中可以看出, 整个 PI 曲线呈线性分布, 这说明采用微通道冷却可以使半导体激光叠阵在整个工作范围内实现稳定的功率输出。

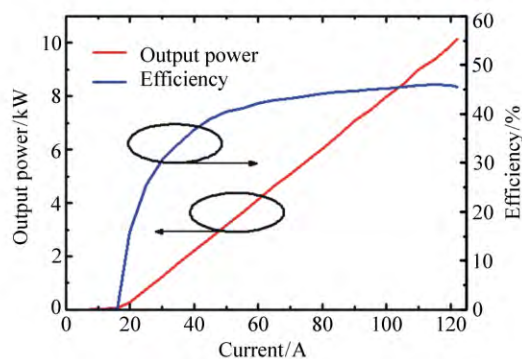


图7 功率和效率随电流的变化曲线

Fig.7 Output power and efficiency versus operating current

半导体激光叠阵的初始电光转换效率约为 50%, 但是经过合成后, 整个激光光源的电光转换效率降至 46%, 主要原因有以下几点: (1) 实验中所用的半导体激光器叠阵为线偏振光输出, 由于

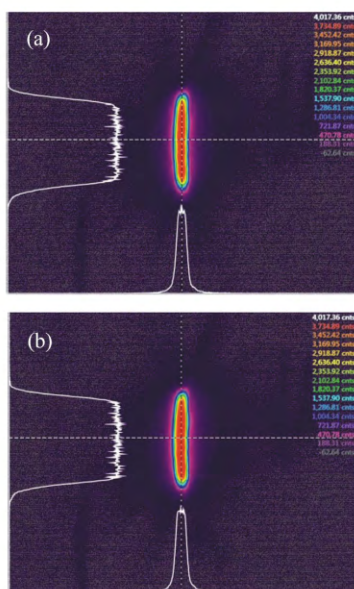


图 8 可靠性测试前 (a) 后 (b) 的光斑图

Fig.8 Profiles of focusing spot before (a) and after (b) the reliability test

半导体激光器量子阱结构及材料组分的限制, 半导体激光器输出激光的偏振度在 98% ~ 99% 之间, 这会在偏振合成过程中产生一定的功率损失^[18]。(2) 由于镀膜工艺的限制, 实验中所用的偏振合成膜系和波长合成膜系很难达到理论设计值, 通常 P 偏振态的激光入射到偏振合成镜上时, 透过率为 96% S 偏振态的激光入射到偏振合成镜上时, 反射率为 99%, 这样在偏振合成环节会产生大约 2.5% 的平均损耗。同样在波长合成环节, 也会产生大约 2.5% 的平均损耗。(3) 由于光源内部的反射镜和透射镜的反射率和透过率也不能达到 100%, 这些较小的损耗积累将会产生

较大的损耗, 这也是光源功率损失的一部分因素。

采用自行设计的聚焦镜组, 合成后的光束聚焦为 2.5 mm × 16 mm 的矩形光斑, 与之前的理论计算值相同。

为了验证光源的可靠性, 本文对半导体激光器进行了 24 h 的可靠性测试实验, 在光源外部光路中利用分光镜将 99.9% 的激光分光, 然后利用功率计进行接收, 再采用 Spiricon 公司的光束分析仪对聚焦光斑变化情况进行监测。图 8 给出了激光光源在可靠性测试前后的光斑变化情况。可以看出, 经过长时间的可靠性测试, 光斑没有明显变化, 这说明光源内部的散热结构有效地减小了透镜因为热应力而产生的形变。激光器可以稳定可靠地长时间工作, 满足激光熔覆、激光热处理的要求。

4 结 论

本文研制了应用于激光熔覆、激光热处理领域的 10 kW 级高可靠性大功率半导体激光光源, 光源内部将偏振合成技术和波长合成技术相结合, 在 122 A 的注入电流下, 输出功率达 10 120 W, 电光转化效率为 46%。通过自行设计的聚焦镜后, 合成后的光斑聚焦为 2.5 mm × 16 mm 的矩形光斑, 可满足工业中大面积快速激光熔覆、激光热处理的需求。实验中对激光光源的热效应进行了分析, 采用自行设计的散热系统对光源内部的光学元件进行散热, 实现了稳定的激光功率输出, 而且光斑分布没有发生变化, 验证了该半导体激光器可以长时间连续工作, 展示了其在激光熔覆、激光热处理等应用中的良好应用前景。

参考文献:

- [1] 海一娜, 邹永刚, 田锐, 等. 水平腔面发射半导体激光器研究进展 [J]. 中国光学, 2017, 10(2): 194-206.
HAI Y N, ZOU Y G, TIAN K *et al.*. Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 194-206. (in Chinese)
- [2] 林星辰, 朱洪波, 王彪, 等. 均匀光强分布的 5 kW 半导体激光硬化光源研制 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1178-1184.
LIN X CH, ZHU H B, WANG B *et al.*. Development of 5 kW diode laser hardening source with homogenized intensity distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1178-1184. (in Chinese)
- [3] 倪羽茜, 井红旗, 孔金霞, 等. 高功率半导体激光器陶瓷封装散热性能研究 [J]. 发光学报, 2016, 37(5): 561-566.
NI Y X, JING H Q, KONG J X *et al.*. Thermal performance of high-power semiconductor laser packaged by ceramic subm-

- ount[J]. *Chinese Journal of Luminescence* 2016 ,37(5) : 561-566.(in Chinese)
- [4] 刘力宁,高欣,张晓磊,等.高亮度大功率半导体激光器光纤耦合模块[J].*发光学报* 2018 ,39(2) : 196-201.
LIU L N ,GAO X ,ZHANG X L *et al.*. Fiber coupling module of high brightness and high power semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence* 2018 ,39(2) : 196-201.(in Chinese)
- [5] 张俊,彭航宇,朱洪波,等.用于不锈钢薄板切割的直接半导体激光光源[J].*发光学报* 2015 ,36(10) : 1188-1194.
ZHANG J ,PENG H Y ,ZHU H B *et al.*. Direct diode laser source for stainless sheet cutting [J]. *Chinese Journal of Luminescence* 2015 ,36(10) : 1188-1194.(in Chinese)
- [6] 刘友强,曹银花,李景,等.激光加工用 5 kW 光纤耦合半导体激光器[J].*光学精密工程* 2015 ,23(5) : 1279-1287.
LIU Y Q ,CAO Y H ,LI J *et al.*. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Opt. Precision Eng.* ,2015 ,23 (5) : 1279-1287.(in Chinese)
- [7] HUANG R K ,CHANN B ,BURGESS J *et al.*. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber , CO₂ , and solid state lasers [J]. *Proceedings of SPIE* 2012 ,8241: 824102.
- [8] VIJAYAKUMAR D ,JENSEN O B ,OSTENDORF R *et al.*. Spectral beam combining of a 980 nm tapered diode laser bar [J]. *Optics Express* 2010 ,18(2) : 893-898.
- [9] BECKER F ,NEUMANN B ,WINKELMANN L *et al.*. Multi-kW cw fiber oscillator pumped by wavelength stabilized fiber coupled diode lasers [J]. *Proceedings of SPIE* 2013 ,8601: 860131.
- [10] VENKAT S ,HAAKE J. *High-Power Diodes in Materials Processing* [M]. Industrial Laser Solutions for Manufacturing , 2007.
- [11] BROOKSHIER S ,WASHKO J ,PARKER K *et al.*. The use of novel , direct diode lasers for large area hard-facing and high deposition rate cladding to enhance surface wear and corrosion resistance [J]. *Proceedings of SPIE* ,2012 ,8239: 82390H.
- [12] BAUMANN M ,KRAUSE V ,BERGWEILER G *et al.*. Local heat treatment of high strength steels with zoom-optics and 10 kW-diode laser [J]. *Proceedings of SPIE* 2012 ,8239: 82390J.
- [13] PEÑANO J P ,SPRANGLE P ,TING A *et al.*. Optical quality of high-power laser beams in lenses [J]. *Journal of the Optical Society of America B* 2009 ,26(3) : 503-510.
- [14] MAHDIEH M H ,JAFARABADI M A ,AHMADINEJAD E. Thermal lens effect induced by high power diode laser beam in liquid ethanol and its influence on a probe laser beam quality [J]. *Proceedings of SPIE* 2015 ,9255: 925531.
- [15] KÖHLER B ,NOESKE A ,KINDERVATER T *et al.*. 11-kW direct diode laser system with homogenized 55×20 mm² Top-Hat intensity distribution [J]. *Proceedings of SPIE* 2007 ,6456: 645600.
- [16] KOENNING T ,ALEGRIA K ,WANG Z L *et al.*. Macro-channel cooled high power fiber coupled diode lasers exceeding 1.2 kW of output power [J]. *Proceedings of SPIE* 2011 ,7918: 79180E.
- [17] PANDEYR ,KOENNING T ,STAPLETON D *et al.*. 4 kW ,1 mm(0.20 NA) ,CW ,single-wavelength ,9xxnm ,fiber-coupled , turn-key diode-lase system [R]. Tucson ,AZ: DILAS Diode Laser Inc.
- [18] MATIOLI E ,BRINKLEY S ,KELCHNER K M *et al.*. High-brightness polarized light-emitting diodes [J]. *Light: Science & Applications* 2012 ,1(8) : e22.

作者简介:



林星辰(1988—),女,助理研究员,2014年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事激光技术应用、激光控制等方面的研究。E-mail: linstars123@163.com



朱洪波(1984—),男,吉林长春人,博士后,2012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,主要从事大功率半导体激光加工光源的研制方面的研究。E-mail: zhbcimp@163.com