文章编号　1004-924X(2017)05-1178-07

均匀光强分布的 5 kW 半导体激光硬化光源研制

林星辰[1]，朱洪波[1*]，王　彪[1]，张亚维[1]，周成林[2]，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. 江苏华博数控设备有限公司，江苏 淮安 223100)

摘要：随着半导体激光自身输出功率和转换效率的提升，半导体激光已经广泛的应用于激光加工领域。本文针对目前激光加工领域对半导体激光硬化光源的需求，研制了波长为 976 nm 的连续输出半导体激光硬化光源。该光源采用空间/偏振合束工艺达到了较高的合束效率，采用柱面微透镜阵列分割与聚焦镜复合较好地匀化了巴条激光器慢轴方向固有的光强起伏，使聚焦光斑的光强呈平顶分布。最后对该光源进行了实验装调和测试。结果表明，在工作电流为 93 A 时，光源的最大输出功率为 5 120W，电光转换效率达 47%，光斑尺寸为 2 mm×16 mm，光斑分布为平顶分布，平整度大于 90%，满足工业中对大面积、高效率激光硬化的要求。

关　键　词：激光加工；高功率半导体激光器；激光光源；激光硬化；合束
中图分类号：TN248.4　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20172505.1178

Development of 5 kW diode laser hardening source with homogenized intensity distribution

LIN Xing-chen[1], ZHU Hong-bo[1*], WANG Biao[1], ZHANG Ya-wei[1],
ZHOU Cheng-lin[2], NING Yong-qiang[1], WANG Li-jun[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Jiangsu Hua Bo Numerical Control Equipment Co., Ltd., Huaian* 223100, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhbciomp@163.com*

Abstract: With the improvement of self output power and conversion efficiency, semiconductor lasers have been widely used in laser processing field. Aiming at current requirement for hardening light source of semiconductor laser in laser processing field, a continuous output hardening light source of semiconductor laser with a wavelength of 976 mm was developed. The light source reached higher beam combination efficiency by adopting space / polarization beam combination technique, and better homogenized inherent light intensity fluctuation along slow axis for laser bar by adopting array division of cylindrical micro lens combined with focusing lens, thus making light intensity of focus spots flatly distributed. Finally, the light source was adjusted and tested experimentally. The results show that when the working current is 93 A, the maximum output power of the light source is 5 120 W, the electro-optical conversion efficiency reaches 47%, the spot size is 2 mm×16 mm and the

收稿日期：2016-12-15；**修订日期**：2017-01-20.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(No. 61306059，No. 61674149)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

flatness of the spot distribution is over 90%, which meet the requirement for large-scale high efficiency laser hardening in industry.

Key words: laser processing; high power diode laser; laser source; laser hardening; beam combination

1 引　言

激光硬化是利用高能激光对工件表面进行局部快速淬火工艺的一种高新技术。该技术能提高金属材料及零件的表面硬度、耐磨性、耐蚀性等性能，目前已经广泛应用于汽车、钢铁、煤炭、电力、石油等行业[1-3]。商用 CO_2 激光器通常能够输出较高的功率，因此在激光硬化领域 CO_2 激光器的使用率偏高。但 CO_2 激光器自身的电光转换效率较低，所以整机设备的耗电量大、运行成本高。随着激光技术的发展，半导体激光器凭借电光转换效率高、体积小、可靠性高等优点而备受瞩目。另外，半导体激光的输出波长为 800～1 000 nm，其波长区段更容易被材料吸收，因此在激光硬化领域有很大优势。近十年来，随着半导体激光合束技术的成熟，半导体激光光源实现了与 CO_2 激光器相当的千瓦级功率输出，开启了它应用于激光硬化领域的大门。目前，半导体激光加工光源已成为大功率激光行业的研究热点[4-8]。德国 DILAS 公司开发出输出波长为 976 nm，功率为 3 kW 的半导体激光硬化光源，工作光斑尺寸有 3 mm×3 mm 和 2 mm×14 mm 两种，整机效率为 45%。德国 Laserline 公司针对激光加工应用中光源的需求，研制出波长为 976 nm，功率为 1～10 kW 的半导体激光硬化光源，光束以光纤传导输出，聚焦光斑为直径 2～4 mm 的圆斑[9-10]。目前，我国也逐渐意识到半导体激光技术在激光加工领域的巨大潜力，且紧紧追赶国外的研究步伐，研究单位主要有西安炬光、北京工业大学等。但由于国内半导体激光技术的起步较晚，而且在半导体激光器件封装、光束整形、高功率半导体激光合束等环节均存在一定的技术瓶颈，半导体激光硬化光源的输出功率局限于 1～3 kW 之间，较国外产品还存在一定差距[11-17]。2015 年，北京工业大学的刘友强等人利用偏振合束和多波长合束技术相结合的方式研制出 5 kW 光纤半导体激光器，不过其工艺流程较为繁琐[18]。

本文针对目前国内工业领域对激光硬化光源的需求，将空间合束和偏振合束技术相结合，研制出输出功率达 5 kW 的半导体激光硬化光源。该光源采用成像结构的微透镜阵列对工作光斑进行匀化设计，使得光斑在焦平面上为矩形平顶分布，以此达到了工业中大面积、高效率激光硬化对光源的要求。

2 实验原理

2.1 半导体激光合束设计

半导体激光叠阵由若干个 bar 条在快轴方向叠加而成，容易获得较大的功率输出，因此实验中采用长春光机所封装的 976 nm 半导体激光叠阵作为单元发光器件，叠阵的主要参数如表 1 所示。考虑到合束过程中激光能量的损失，5 kW 级功率的输出需要 4 个半导体激光叠阵。

表 1　叠阵的主要参数

Tab. 1　Typical values of stacks

参量	数值
叠阵层数/层	15
每层间隔/mm	1.8
bar 条发光单元个数	19
bar 发光单元周期/μm	500
bar 发光单元宽度/μm	100
快轴发散角 θ_{FA}(90% PC)	70°
慢轴发散角 θ_{SA}(90% PC)	10°
输出功率/(W·bar^{-1})	100
电光转换效率/%	55
叠阵总输出功率/W	1 500

从表 1 可以看出，叠阵快慢轴方向具有较大的发散角，不利于光束传输，因此需要对叠阵光束进行准直[19]。快轴准直采用德国 LIMO 的

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

FAC590 非球面柱面微透镜，焦距为 0.59 mm；慢轴准直采用 SAC100-500，焦距为 2.88 mm。经过准直后，激光器快轴和慢轴方向的发散角的理论值分别为 3 mrad(90%能量)和 40 mrad(90%能量)，如图 1 所示。

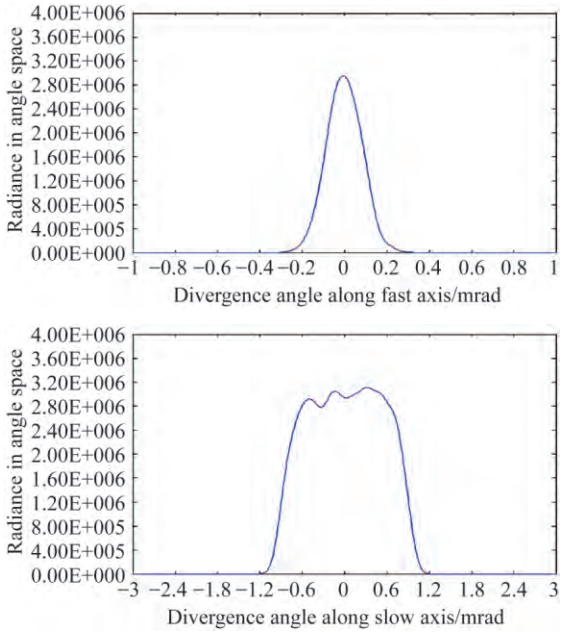


图 1 半导体激光叠阵准直后的发散角分布

Fig. 1 Divergence angles of diode laser stacks after collimation

由于叠阵中每层激光 bar 条的微通道厚度为 1.8 mm，而每层 bar 条经过快慢轴准直后，快轴方向的光束宽度为 0.8 mm，这样使得叠阵的每层光束之间存在一定间隔，导致光强度降低。本文采用厚度均为 0.9 mm 的三角棱镜和方形棱镜层层间隔叠加组成棱镜阵列，使两叠阵发出的光产生透射和反射，实现空间合束，这样可以在不改变光束质量的前提下将功率密度提高一倍。

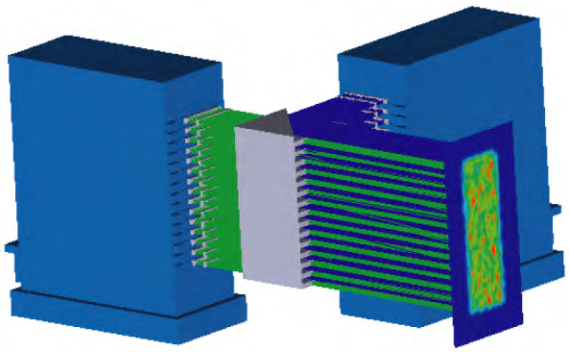


图 2 叠阵快轴方向空间合束示意图

Fig. 2 Spatial combination in fast axis direction

为了进一步提高功率，两只半导体激光叠阵在进行空间合束后还需要与另外两只叠阵进行偏振合束。目前，976 nm 半导体激光 bar 条均为 TE 模式，即磁场矢量振动方向与 p-n 结平面方向相互垂直，为 P 偏振光，需要通过半波片将其中一个叠阵的偏振态改变为 S 偏振，再采用偏振合束镜片将 P 光和 S 光两路光合成一路[15]。

2.2 匀光设计

在激光硬化加工中，光强分布为平顶分布的光斑可以得到均匀的加工效果，因为均匀分布的功率密度不会给材料基体造成较大的局部热畸变，也不会因局部能量过高而损坏材料。CO_2 激光器只有使用积分镜才可以将高斯光束转换为平顶矩形光束。半导体激光光源的快轴光强呈高斯分布，慢轴光强接近于平顶分布，在实际应用中加工光斑快轴方向的均匀度并不影响加工效果，因此光斑匀化不是对二维矩形光斑的整体要求，而是对慢轴方向的均匀度有工业要求，但光斑功率密度均匀性及光斑边缘陡度还不够理想。本实验采用由微柱透镜阵列组成的匀光系统对半导体激光慢轴光强进行匀光，具体原理如图 3 所示[20]。

匀光系统由两个平行相对放置的微柱透镜阵列构成，阵列中各透镜单元均为微柱透镜，且完全相同，两片微柱透镜阵列曲面相对放置，其间距等于微柱透镜阵列中子透镜的焦距 f_1。第一片微透镜阵列作为场镜，将准直入射来的半导体激光分割成若干条子光束，分别聚焦在第二片微柱透镜阵列子透镜的中心，具体的分割数量依据入射光的宽度及微透镜阵列的间距 p 来确定。第二片微柱透镜阵列进一步匀化第一片微柱透镜阵列各透镜单元发出的光束，以避免匀化后光斑出现间隔，并连同聚焦镜，将此光束在焦平面上重叠成像。子光束的叠加消除了单个子光束照射到目标面上的不均匀性，这样在焦平面上可得到呈平顶分布的一维线光斑。均匀分布的线光斑宽度 w 为[21]：

$$w = p \cdot \frac{f_2}{f_1}. \tag{1}$$

为了避免加工过程中烟尘飞溅等对激光窗口造成损伤，在激光硬化加工的实际操作中工作距离要足够长，实验中将激光聚焦镜的焦距设定为 350 mm。为了实现大面积、高效率的激光硬化要求，聚焦光斑的慢轴尺寸定为 16 mm，通过计算

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

比对，选用间距为 1.3 mm，曲率为 12.5 mm 的微透镜阵列，焦距为 27.8 mm。将微透镜阵列参数输入 ZEMAX 进行模拟，得到的聚焦光斑及光强分布如图 4 所示。

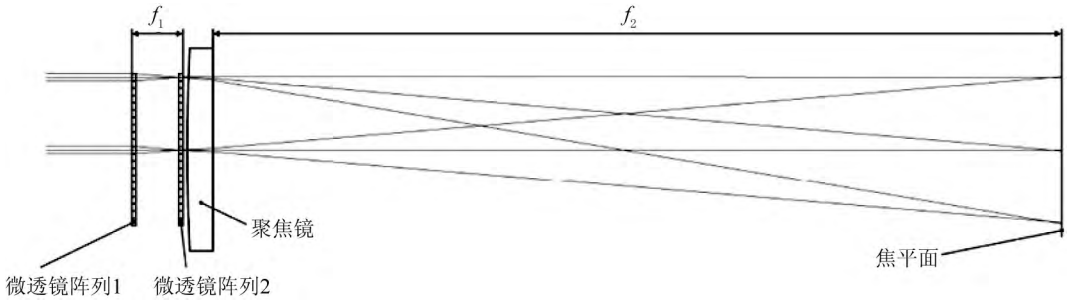
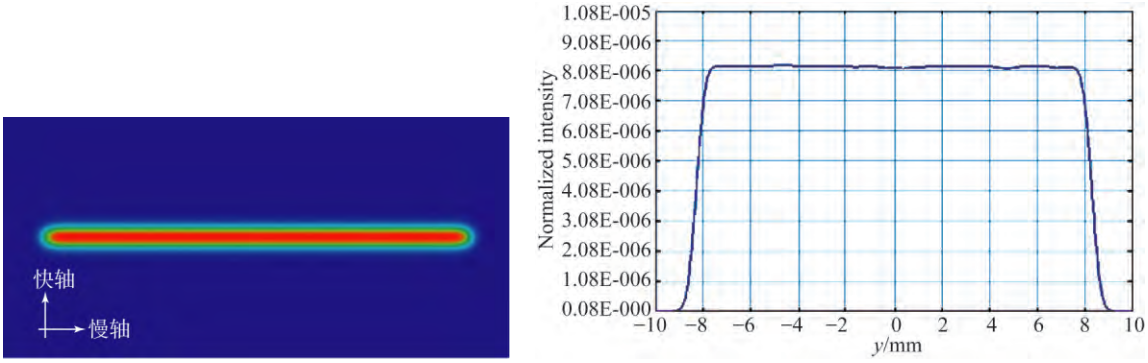


图 3　光强分布匀化原理图

Fig. 3　Principal digram of homogenized intensity distribution



(a)聚焦光斑
(a)Focused light spot

(b)聚焦光强分布
(b) Distribution of homogenized intensity

图 4　经过匀光处理后微透镜阵列的性能模拟

Fig. 4　Simulation of parameters of micro lens array after homogeneization

3　实验与结果分析

3.1　装调实验

首先对半导体激光叠阵进行快慢轴准直，由于 976 nm 的激光波段人眼不可见，所以采用 CCD 进行辅助装调。在 CCD 中观察到准直光斑与理论情况基本相符后，采用狭缝法检测准直光斑，保证每层 bar 条的准直具有一致性。将两只安装了快慢轴准直镜的叠阵的高度差控制在 1.8 mm，呈垂直放置，按照图 2 介绍的空间合束方法进行合束。由于叠阵的输出功率较高，所以在装调中使用 10 A 的小电流进行调试，使用 6 维调整架将事先粘好的棱镜叠层(见图 5)放入激光光路中，并进行多角度调整，用 CCD 观察合束后的光斑图样，当光屏上出现清晰的叠阵光斑图样时，采用功率计对光斑进行测试。在 93 A 的电流下，激光功率达到最大，此时将棱镜叠层用紫外胶进行固定。

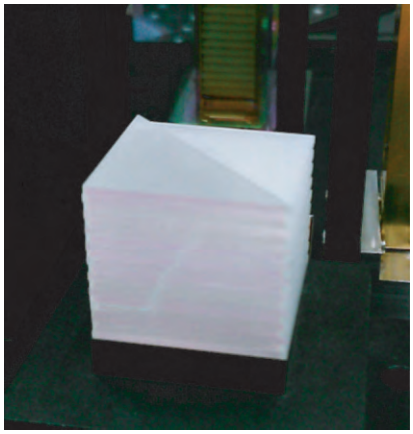


图 5　棱镜叠层照片

Fig. 5　Photo of prism stacks

将两路空间合束的激光利用偏振合束方式进行合束，使得 4 只叠阵发出的光最终合成一路。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

最后，通过装调好的微透镜阵列和聚焦镜对聚焦光斑进行匀化聚焦。采用水冷功率计测量光斑，在注入电流为 0～93 A 的范围内进行调节，并记录功率，绘制成 *P-I* 特性曲线，如图 6 所示。在注入电流为 93 A 时，输出功率达到 5 120 W，电光转效率为 47%，激光光源实物如图 7 所示。

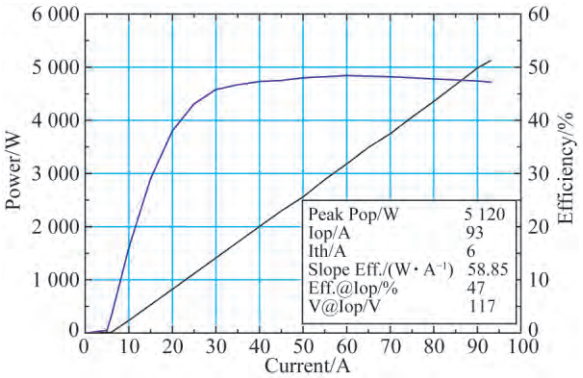


图 6　根据测量数据绘制的光源 P-I 特性曲线

Fig. 6　*P-I* curve based on measured values

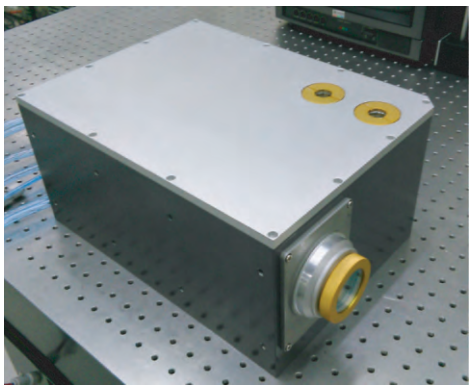


图 7　5 kW 半导体激光硬化光源

Fig. 7　5 kW diode laser source for laser hardening

3.2　结果分析

采用光束质量分析仪对聚焦光斑进行测试，结果如图 8 所示，快慢轴方向的聚焦光斑尺寸为 2 mm×16 mm，与理论值相符合。光斑强度分布接近平顶分布，光强分布的平整度为[22]：

$$平整度=(I_{max}-I_{min})/(I_{max}+I_{min}),\qquad(2)$$

其中：I_{max}为光斑分布强度最大值，I_{min}为强度最小值。通过 MATLAB 对曲线进行拟合计算，平整度>90%。利用匀化后的平顶式光斑加工基材表面，并与未匀化光源相比，基材表面的平整度得到了显著提高。

针对整个激光光源功率损耗的问题，分析得出以下 3 点原因：(1)在空间合束过程中，棱镜叠层的厚度为 0.9 mm，每层叠阵的光斑宽度为 0.8 mm，由于快轴准直镜装调误差造成叠阵的光斑与棱镜叠层失配，加之叠阵每层的间隔并不能完全控制在 1.8 mm，因此产生功率损耗[23]；(2)在偏振合束过程中，P 偏振光和 S 偏振光以 45°角入射到偏振合束片，与以布儒斯特角入射的理想情况相比，存在一定的角度误差，而且半导体激光叠阵发出的 P 偏振光具有一定的偏振纯度，约为 98%，由此导致偏振合束效率与理论设计存在差值；(3)整个光路中的光学元件均镀有增透膜，透过率为 99%～99.7%，多层增透膜的功率损耗累加也会造成光源功率损失。

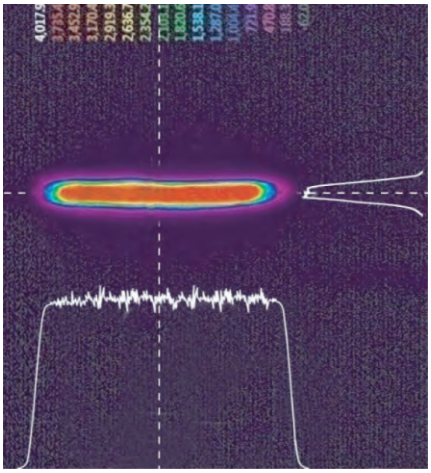


图 8　聚焦光斑的光强分布

Fig. 8　Homogenized intensity distribution of focused spot

4　结　论

本文采用空间合束与偏振合束相结合的方法，将 4 只波长为 976 nm 的半导体激光叠阵合束成一路，在 93 A 的工作电流下，最大输出功率为 5 120 W，电光转换效率达 47%，工作面聚焦的光斑尺寸为 2 mm×16 mm，光斑分布为平顶分布，平整度大于 90%，符合工业上大面积、高效率激光硬化的要求。总体看来，半导体激光单元器件的输出功率、叠阵封装质量及光学元件性能是整个 5 kW 半导体激光硬化光源研制中关键的技术难点，后续工作中将对光源进行改进，以进一步提高半导体激光硬化光源的功率水平及可靠性。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 伍耀庭，刘继常，刘石柏，等. 半导体激光在再制造产业中的应用[J]. 应用激光，2013，33(3)：333-339.
WU Y T，LIU J CH，LIU SH B，*et al*.. Application of diode laser in the remanufacturing industry [J]. *Applied Laser*，2013，33(3)：333-339.（in Chinese）

[2] 王超，蔡红，叶俭，等. Cr_{12}MoV 钢的高功率半导体激光表面硬化[J]. 热处理，2013，28(1)：47-51.
WANG CH，CAI H，YE J，*et al*.. Surface hardening of Cr_{12}MoV steel by high power diode laser [J]. *Heat Treatment*，2013，28(1)：47-51.（in Chinese）

[3] 郭士锐，陈智君，张群莉，等. 大功率半导体激光表面改性的研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2013，50(5)：050004.
GUO SH R，CHEN ZH J，ZHANG Q L，*et al*.. Research progress on laser surface modification by high-power diode laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*，2013，50(5)：050004.（in Chinese）

[4] 朱洪波，张金胜，马军，等. 10 kW 连续输出半导体激光熔覆光源[J]. 光学 精密工程，2013，21(4)：829-834.
ZHU H B，ZHANG J SH，MA J，*et al*.. 10 kW CW diode laser cladding sources [J]. *Opt. Precision Eng*.，2013，21(4)：829-834.（in Chinese）

[5] 谭昊，郭林辉，高松信，等. kW 级光纤耦合输出二极管激光器模块[J]. 强激光与粒子束，2012，24(11)：2581-2584.
TAN H，GUO L H，GAO S X，*et al*.. kW-output fiber coupled diode laser module [J]. *High Power Laser and Particle Beams*，2012，24(11)：2581-2584.（in Chinese）

[6] 张俊，单肖楠，刘云，等. 千瓦级高光束质量半导体激光线阵合束光源[J]. 中国激光，2012，39(2)：0202010.
ZHANG J，SHAN X N，LIU Y，*et al*.. Kilowatt-output and high beam quality diode laser linear array coupling source [J]. *Chinese Journal of Lasers*，2012，39(2)：0202010.（in Chinese）

[7] HUANG R K，CHANN B，BURGESS J，*et al*.. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber，CO_2，and solid state lasers [J]. *SPIE*，2012，8241：824102.

[8] BAUMANN M，KRAUSE V，BERGWEILER G，*et al*.. Local heat treatment of high strength steels with zoom-optics and 10kW-diode laser [J]. *SPIE*，2012，8239：82390J.

[9] MALCHUS J，KRAUSE V，KOESTERS A，*et al*.. A 25 kW fiber-coupled diode laser for pumping applications [J]. *SPIE*，2014，8965：89650B.

[10] 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]. *SPIE*，2012，8239：82390H.

[11] XIONG L L，WANG M，WANG X B，*et al*.. 3000W CW diode laser cladding system [J]. *SPIE*，2012，8241：824106.

[12] 张俊，彭航宇，刘云，等. 三波长合束高亮度半导体激光光源[J]. 中国激光，2013，40(4)：0402011.
ZHANG J，PENG H Y，LIU Y，*et al*.. High brightness diode laser source based on three-wavelength multiplexing [J]. *Chinese Journal of Lasers*，2013，40(4)：0402011.（in Chinese）

[13] 彭航宇，张俊，付喜宏，等. 高效外腔光谱合束半导体激光器阵列[J]. 中国激光，2013，40(7)：0702015.
PENG H Y，ZHANG J，FU X H，*et al*.. High-efficiency external cavity spectral-beam-combined diode laser array [J]. *Chinese Journal of Lasers*，2013，40(7)：0702015.（in Chinese）

[14] 朱洪波，李艳华，郝明明，等. 基于偏振复用技术的半导体激光加工光纤耦合模块[J]. 光学 精密工程，2013，21(5)：1137-1143.
ZHU H B，LI Y H，HAO M M，*et al*.. Fiber coupled diode laser module for laser processing by polarization multiplexing [J]. *Opt. Precision Eng*.，2013，21(5)：1137-1143.（in Chinese）

[15] 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.
HAO M M，QIN L，ZHU H B，*et al*.. High power 976 nm fiber coupled module based on diode laser short bars [J]. *Opt. Precision Eng*.，2013，21(4)：895-903.（in Chinese）

[16] 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）

[17] 王立军，彭航宇，张俊. 大功率半导体激光合束进

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

展[J]. 中国光学, 2015, 8(4):517-534.
WANG L J, PENG H Y, ZHANG J. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4):517-534. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 郎超, 尧舜, 陈丙振, 等. 半导体激光器阵列的"smile"效应对光束质量的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502006.
LANG CH, YAO SH, CHEN B ZH, *et al*.. "Smile" effect on the beam quality for diode laser arrays [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 0502006. (in Chinese)

[20] TRAUB M, HOFFMANN H D, PLUM H D, *et al*.. Homogenization of high power diode laser beams for pumping and direct applications [J]. *SPIE*, 2006, 6104: 61040Q.

[21] KÖHLER B, AHNEPOHL F, ROTTER K, *et al*.. New approach for high-power diode laser modules with homogenized intensity distribution [J]. *SPIE*, 2011, 7918: 79180U.

[22] REVERMANN M, BAYER A, MEINSCHIEN J. Line length scalable high power diode laser with power densities>100 kW/cm^2 for industrial Si-annealing applications [J]. *SPIE*, 2008, 6879:68790R.

[23] 周旻超, 江先锋, 张丽芳, 等. 大功率半导体激光器叠阵的光学性能[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1202004.
ZHOU M CH, JIANG X F, ZHANG L F, *et al*.. Optical performance of high power laser diode stack [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 1202004. (in Chinese)

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

通讯作者:

朱洪波(1984—),**男**,**吉林长春人**,**博士**,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。E-mail:zhbciomp@163.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net