

文章编号: 1000-7032(2015)10-1188-07

用于不锈钢薄板切割的直接半导体激光源

张 俊, 彭航宇*, 朱洪波, 秦 莉, 宁永强, 王立军

(发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对高功率半导体激光器存在的光束质量差、单元功率低的缺点, 利用合束技术来提高激光功率及光束质量, 配合 QBH 光纤前端帽优化聚焦镜以实现高效耦合。采用 11 个条宽 5.4 mm 的迷你线阵合束, 通过光束整形、空间合束、偏振合束和波长合束, 聚焦耦合进 200 $\mu\text{m}/0.2$ 光纤。在 50 A 电流下, 实现连续 386 W 输出, 功率密度为 1.23 MW/cm^2 , 电光效率为 43.6%。在 200 W 的功率下, 该激光器可以切割厚度为 1 mm 的不锈钢薄板。

关键词: 半导体激光器; 不锈钢薄板切割; 激光合束; 光纤耦合

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20153610.1188

Direct Diode Laser Source for Stainless Sheet Cutting

ZHANG Jun, PENG Hang-yu*, ZHU Hong-bo, QIN Li, NING Yong-qiang, WANG Li-jun

(State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding Author, E-mail: imphy@163.com

Abstract: 11 mini-bars with a width of 5.4 mm were coupled into a 200 $\mu\text{m}/0.2$ QBH fiber by beam shaping, spatial overlapping, polarization multiplexing, and wavelength multiplexing. The diode laser source with a continuous wavelength power of 386 W, a power density of 1.23 MW/cm^2 and the electro-optical (E-O) efficiency of 43.6% at 50 A emitting from the fiber is developed. This laser source has been employed to directly cut the stainless sheet with the thickness of 1 mm at the output power of 200 W.

Key words: diode laser; stainless sheet cutting; laser coupling; fiber coupled

1 引 言

高功率半导体激光器以体积小、重量轻、可直接电泵浦、效率及可靠性高等优点著称, 在激光加工及国防等领域有很大的应用潜力, 但其单元功率低、光束质量差及光场分布不均匀的缺点限制了它作为直接光源的应用。目前, 高功率半导体

激光器主要作为其他如全固态激光器、光纤激光器等激光源的泵浦源使用。激光合束及光纤耦合技术加快了半导体激光器作为直接光源使用的步伐。激光合束技术可将多个单元激光束整合成一束, 直接发挥激光熔覆、激光硬化等作用, 在获得高功率输出的同时还可均衡半导体激光器的光束质量。光纤耦合技术利用光纤圆形波导结构多次

收稿日期: 2015-06-02; 修订日期: 2015-08-11

基金项目: 科技部重大仪器专项(2011YQ04007702); 国家自然科学基金(61204055, 61404137); 中科院院国防青年基金(CXJJ-14-Q57); 吉林省科技发展计划(20140101172JC); 吉林省国际合作项目(20150414053GH); 吉林省青年基金(20140520140JH)资助项目

内反射作用机理将激光束重新整合,使得在光纤输出端面获得具有圆对称、光强分布均匀的光斑,同时加长了激光源与加工面的距离,使激光源本身免受加工环境中热、飞溅物等影响,提高了激光源使用过程中的可靠性。

光纤耦合半导体激光源的研究现已进入实用化。其中德国 Laserline 已形成系列产品,连续功率 3 000 W、400 μm 芯径/NA 0.1 的光纤输出产品已应用在激光焊接等场合;德国 Limo 也研制出 2 000 W、200 μm 芯径/NA 0.22 的光纤输出光源^[1];德国 Dilas 采用波长 976 nm 的 28 个激光线阵,从 200 μm 芯径/NA 0.22 的光纤中输出连续功率 775 W^[2];美国夫琅和费激光技术中心采用 120 个激光单管合束,从 200 μm 芯径/NA 0.2 的光纤中输出连续功率 700 W^[3]。国内在光纤耦合半导体激光源方面的研究进展相对滞后,直接输出光源可达上万瓦^[4],而光纤输出产品主要在百瓦量级,作为光纤激光泵浦源使用,功率相对较低。目前已报道的光纤输出光源的功率从数百瓦至两千瓦都有^[5-7],但光纤芯径较大,一般为 400~800 μm ,不能满足激光切割等对光斑直径及功率密度要求高的场合^[8]。

本文采用 5 个 915 nm 和 6 个 976 nm 共 11 个半导体激光 mini 线阵制作了光纤耦合半导体激光光源。其中每个线阵条宽均为 5.4 mm,包含 10 个激光单元,填充因子为 18%,相对于常规厘米线阵,光束质量直接提高近一倍。通过光束整形、空间合束、偏振合束及波长合束等合束技术进行光束整合。考虑高功率下采用 QBH 光纤,其前端帽的玻璃柱会造成光束质量变差,所以在此针对性地设计聚焦镜,最后将光束高效耦合进 200 μm /0.2 的光纤中,实现了连续功率 386 W、功率密度为 1.23 MW/cm² 激光输出,并实验切割了 1 mm 厚的不锈钢薄板。

2 实验设计

半导体激光光束质量采用光参量积(Beam parameter product, Q)评价,定义为激光束的束腰半径 $w_0/2$ 与远场发散角半角 $\theta_0/2$ 的乘积^[9]。相应地,光纤的光束质量可用纤芯半径 r 与数值孔径 NA 的乘积表示。

为了实现有效光纤耦合,需要激光束的光斑尺寸 w 和发散角 θ 均小于等于光纤的芯径 d 和数

值孔径 NA ,即 $w \leq d, \theta \leq NA$ 。

考虑到半导体激光输出光强及发散角分布在快慢轴方向具有很大差别,激光束整体光斑尺寸(w_i)及发散角(θ_i)均以两轴光斑尺寸及发散角的对角线值表示,如图 1 所示。为了便于说明由于半导体激光芯片结构导致的特殊光场分布,定义平行于激光芯片外延生长的方向为 X ,垂直于激光芯片外延生长的方向为 Y 。

$$w_i = \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \geq \sqrt{2}w, \quad (1)$$

$$\theta_i = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} \geq \sqrt{2}\theta, \quad (2)$$

当 $w = w_x = w_y, \theta = \theta_x = \theta_y$ 时,式(1)和式(2)取等, w_i 和 θ_i 获得最小值,因此高效的光纤耦合要求 $w_i \leq d, \theta_i \leq NA$,对应地能耦合进的光纤光束质量要求为:

$$Q_{\text{fiber}} \geq 2w\theta, \quad (3)$$

因此,半导体激光束高效率耦合进光纤应满足:

(1) 半导体激光束两个方向的光斑尺寸、发散角分别相等;(2) 聚焦光斑尺寸及发散角的对角线值分别小于等于光纤的芯径和数值孔径;(3) 激光束单方向的光束质量值不超过光纤光束质量值的 1/2。

为将光束耦合进细光纤,我们采用整体条宽

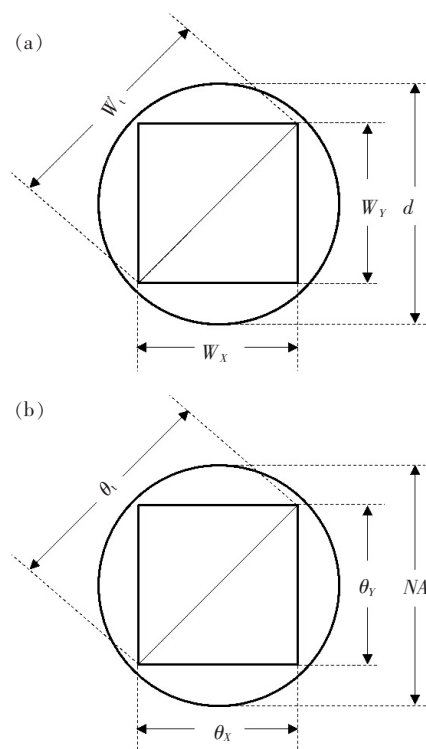


图 1 光纤耦合对激光光斑(a)及发散角(b)的要求
Fig. 1 Demand of fiber coupling for laser spot size (a) and divergence angle (b)

为 5.4 mm 的高光束质量半导体激光线阵芯片, 相对于条宽 10 mm 的常规芯片, 在发散角相同条件下, 慢轴方向的光束质量可直接提高近一倍。

所采用的激光芯片在慢轴方向具有 10 个激光单元, 每个激光单元条宽为 90 μm , 相邻激光单元空间周期为 500 μm , 填充因子为 18%。快轴方向 1.5 μm 条宽输出发散角为 50° (90% 功率), 慢轴方向发散角为 7° (90% 功率)。

该激光线阵原始输出光束在 X 方向为慢轴方向, Y 方向为快轴方向, 两个方向的光束质量 Q_{x0} 和 Q_{y0} 分别为 165 mm · mrad 和 0.327 mm · mrad, 相差约 500 倍。相对于常规的厘米条宽激光器, 其 X 方向的光束质量直接提高近一倍。

采用斜 45° 柱透镜阵列对激光线阵光束整形, 直接将激光线阵上的每个激光单元 X、Y 方向的光强及发散角分布翻转 90°, 则 X 方向变为 10 个激光单元在快轴方向叠加, Y 方向变为 1 个激光单元的慢轴方向。考虑到快轴方向光束准直, 采用焦距为 0.365 mm 的柱透镜可将快轴方向准直到 6 mrad, 10 个激光单元的光斑整体尺寸为 5.5 mm, 则 X 方向的光束质量变为 8.25 mm · mrad, Y 方向的光束质量为 2.75 mm · mrad, 两者倍数关系变为 3 倍, 仅需在 Y 方向叠加 3 个光斑即可实现两轴光束质量均衡。为了使两个方向的

发散角尽可能相等, Y 方向采用焦距为 15 mm 透镜准直, 理论计算可实现 6 mrad 光束输出, 对应尺寸为 1.83 mm。3 光斑无缝空间合束后, 整体光斑为 5.5 mm, 两轴上的光斑也实现一致, 此时 X、Y 两轴方向的光束质量均为 8.25 mm · mrad, 根据式(3)要求光纤的光束质量大于等于 16.5 mm · mrad, 则取芯径 200 μm 、NA 0.2 的光纤(光

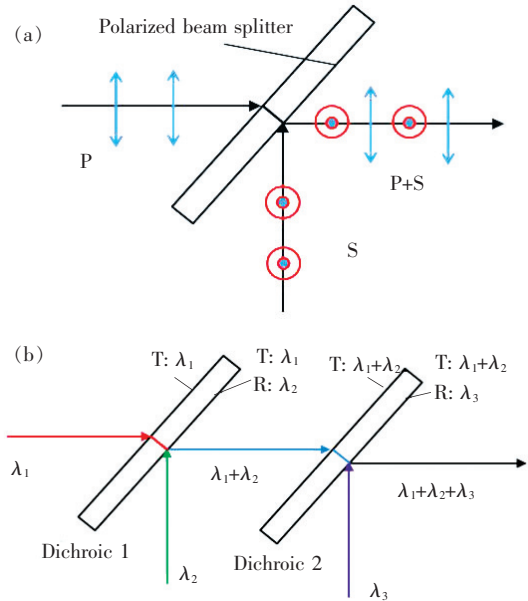


图 2 偏振合束(a)和波长合束(b)示意图

Fig. 2 Principle of polarization multiplexing (a) and wavelength multiplexing (b)

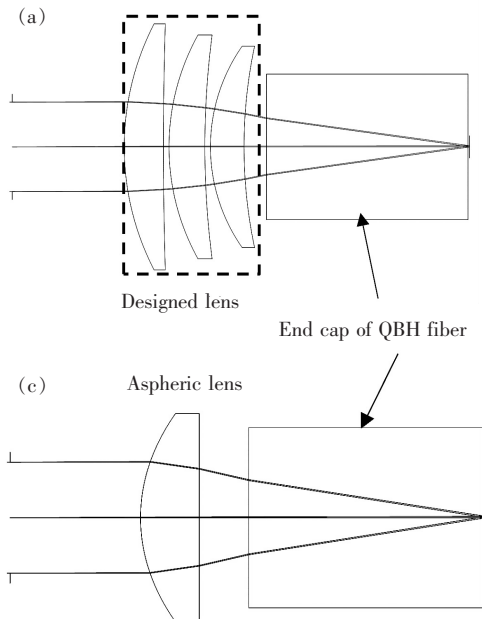
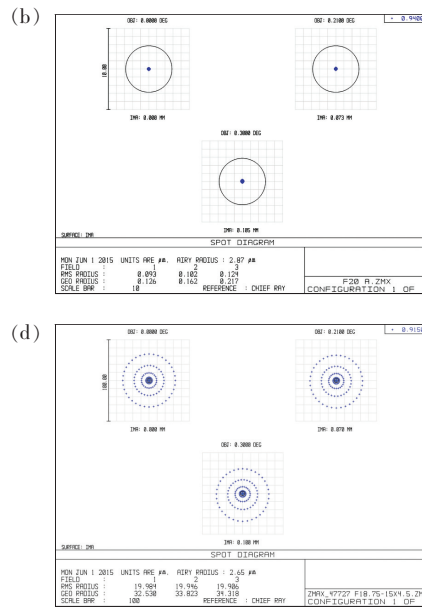


图 3 聚焦光学组件对比。(a) 设计的光学组件; (b) 设计的光学组件的输出点阵图; (c) 商用透镜; (d) 商用透镜的输出点阵图。

Fig. 3 Comparison of the focus optics. (a) Designed focus lens. (b) Output spot diagram of the designed focus lens. (c) Commercial aspheric lens. (d) Output spot diagram of the commercial aspheric lens.



束质量为 $20 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) 可满足使用要求。

为了进一步提高输出激光功率而不增大激光束的 Q 值, 利用半导体激光束的线偏振特性和光谱特性, 通过偏振分光棱镜 (偏振分光片) 和二向分色镜, 一束光透过, 另一束光反射, 实现偏振合束和波长合束 (图 2), 可实现激光功率的倍数增加。

由于激光功率在数百瓦量级, 常规光纤容易损伤, 在此采用带水冷的 QBH 光纤进行耦合输出。QBH 光纤前端帽为熔石英材料的玻璃圆柱, 它会引入额外的像差, 在激光聚焦耦合时必须考虑。根据光纤的数值孔径及芯径要求, 并考虑 QBH 光纤端帽对聚焦性能的影响, 设计焦距为 20 mm 的聚焦镜。图 3(a) 和图 3(b) 分别为设计的球面透镜组和输出点阵图。入射光经过设计的 3 片组合透镜和 QBH 光纤端帽后, 不同视场的聚焦光斑均远小于爱里斑, 像差得到很好的矫正。而常规的高像质非球面镜没有考虑该部分像差, 耦合效率低。图 3(c) 和图 3(d) 分别为商用的高像质非球面透镜和输出点阵图, 相较于图 3(b), 相同视场的光斑远大于爱里斑, 残余像差非常大, 不能用于细光纤的耦合。因此, 设计并加工 3 片圆透镜组合进行光纤耦合。

3 实验装置

采用 11 个输出特性相近的半导体激光线阵, 其中 915 nm 波长 5 个 (结构本身可耦合 6 个, 但实验时仅有 5 个完好线阵), 976 nm 波长 6 个, 单个激光线阵的输出功率效率曲线如图 4 所示。当电流为 50 A 时, 915 nm 激光线阵输出功率为 51 W , 电光转换效率达 63.3% ; 976 nm 激光线阵输出功率为 50.3 W , 电光转换效率达 62.5% 。

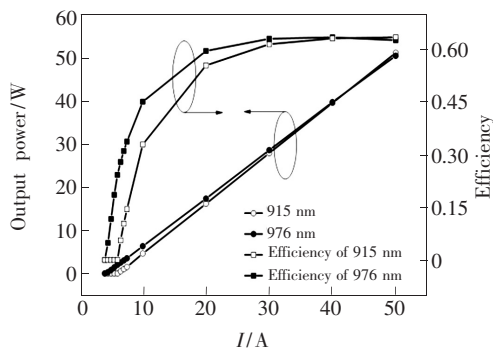


图 4 915 nm 和 976 nm 激光线阵的输出功率-效率曲线
Fig. 4 CW power and efficiency vs. current of laser bars of 915 nm and 976 nm

将相同波长的激光线阵分成两组, 每组 3 只 (其中 915 nm 激光线阵缺少 1 只), 进行如图 5 所示的排列, 每只激光器和对应的快轴准直镜 (FAC)、斜 45° 柱透镜阵列 (BTS)、慢轴准直镜 (SAC)、反射镜 (Reflector) 放置在阶梯底座 (Stair base) 的同一层上面。台阶底座相邻台阶高度差为 1.83 mm , 通过每层台阶上的反射镜将光路偏折 90° , 实现空间上 Y 方向的光叠加, 形成一个单波长、线偏振输出的线阵合束单元。

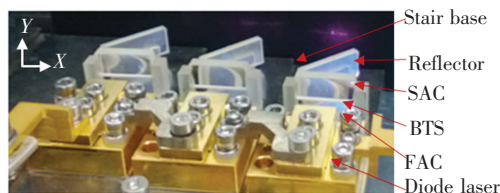


图 5 同一波长、相同偏振态的 3 个激光线阵进行空间合束的装置图。

Fig. 5 Spatial overlapping of three bars with the same wavelength and polarization

图 6 为 50 A 电流驱动下, 3 只激光线阵经过空间合束后的输出光斑, 单元光束之间的空间缝隙被完全填满, 光斑呈方形, 两方向尺寸均为 5.5 mm 。

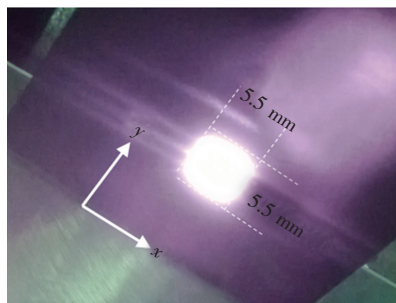


图 6 50 A 电流驱动下的 3 只激光线阵空间合束后输出光斑

Fig. 6 Output spot after spatial overlapping at 50 A

然后, 将相同波长、相同偏振态的两组线阵合束, 其中一组通过半波片 90° 旋转偏振态, 与另一组直接输出进行偏振合束, 形成单波长、圆偏振光输出合束单元。再用二向分色镜进行波长合束, 976 nm 激光反射, 915 nm 激光透射, 实现双波长光束, 至此 11 个激光线阵合束实现单光束输出。

4 结果与讨论

经过偏振合束和波长合束后, 采用 PRIMES

公司的光束质量分析仪,在未进行任何衰减的情况下,直接测量经过焦距 35 mm 透镜聚焦后的光斑,结果如图 7 所示。整体光束质量采用包含 86% 功率评价为 $11.76 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,采用二阶矩方式评价时为 $14.17 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,均小于光纤的光束质量 $20 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,满足光束质量设计指标要求。

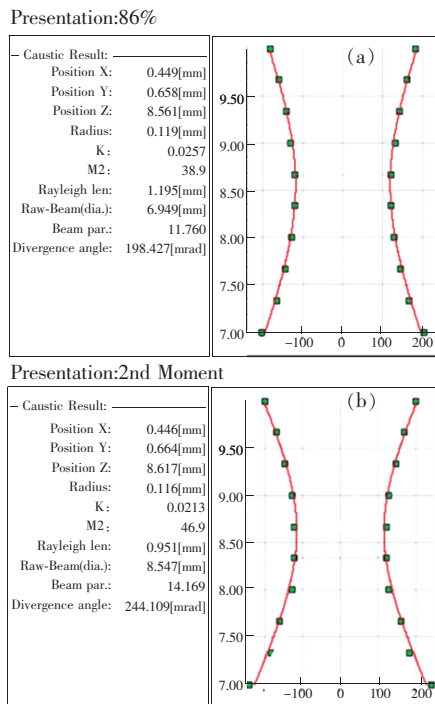


图 7 偏振波长合束后的光束质量测试结果。(a) 包含 86% 功率;(b) 二阶矩评价标准。

Fig. 7 Measure results of the laser beam quality after polarization and wavelength multiplexing according to 86% content (a) and the second moment (b)

将光束经过焦距 20 mm 的透镜组聚焦耦合进光纤后,200 $\mu\text{m}/0.2$ 光纤的输出功率-效率曲线及光纤输出端光强分布如图 8 所示。当电流为 50 A 时,连续输出功率为 386 W,电光转换效率为 43.6%,在 30 A 时获得最大电光转换效率 47.5%。从光纤输出端光强分布可看出,输出光斑边缘锐利,激光主要集中在光纤纤芯传输,包层能量少,这可提高光纤的使用寿命。若光纤输出端以 1:1 光学元件进行成像,输出光斑保持为 200 μm ,则激光功率密度可达 $1.23 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。

相对于激光线阵输出的 556.8 W 总功率,光纤输出为 386 W,其功率损失主要来自以下几方面:

(1) 空间合束损失。

空间合束方向为激光慢轴方向,该方向发散

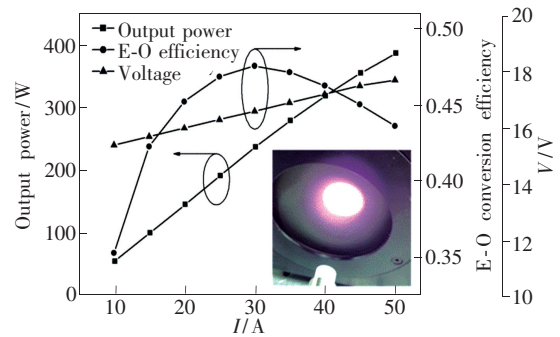


图 8 200 $\mu\text{m}/0.2$ 光纤的输出连续功率-效率曲线及输出端光斑图

Fig. 8 CW power and efficiency vs. current, and laser profile from a 200 $\mu\text{m}/0.2$ fiber.

角受热串扰、热扰动等影响,随注入电流的增加而增大。10 A 低电流调至最高合束效率,在 50 A 电流时,慢轴发散角的增大使得空间合束镜存在遮光和漏光情况,合束效率下降,如 30 A 时合束效率为 93%,而 50 A 时则降至 90%。该部分损失可通过增加台阶高度来改进,但它会造成合束光斑变大,光纤耦合效率降低,因此需要整体权衡。

(2) 波长合束损失

合束镜受镀膜限制,915 nm 和 976 nm 的总体合束效率仅为 92%。

(3) 偏振合束损失

采用消色差半波片偏振转换后由偏振分光片合束,整体效率为 95% 左右。

(4) 透镜表面反射损失

由于光路涉及多片透镜,尽管单面透过率达到 99.2% (宽带 900 ~ 990 nm 增透),但经快轴准直、光束变换、慢轴准直及 3 片聚焦一共 12 个增透面后,不考虑材料吸收,整体透过率仅为 90%。另外,聚焦耦合及材料吸收也会造成部分功率损失。

为提高合束效率,可从以下几方面进行改进:

(1) 从芯片设计、封装及散热层面改进,加强对激光单元慢轴发散角的控制,提高激光单元的光束质量;(2) 权衡设计空间合束,保证高电流下的合束效率;(3) 改进镀膜技术,提高波长合束镜和偏振合束镜的效率,从而直接提高光源整体效率;(4) 设计生产考虑 QBH 光纤端帽的非球面镜,尽管 3 片式球面透镜对像质有改善,但由于透镜数量增加,势必造成装调难度增加及整体效率下降。

50 A 电流下, 采用 Ando 6317B 光纤光谱仪测得如图 9 所示的输出光谱, 中心波长分别为 915.2 nm 和 976.5 nm, 谱宽(FWHM)分别为 3.0 nm 和 3.4 nm, 与激光线阵的输出光谱特性近似一致。

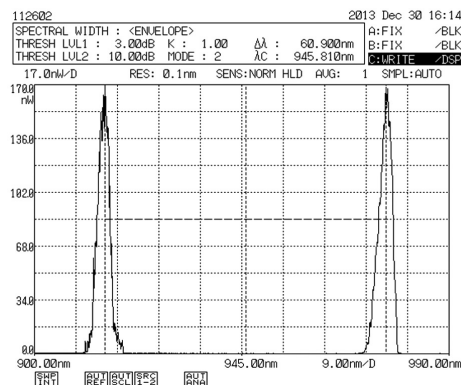


图 9 50 A 电流时的输出光谱

Fig. 9 Spectrum distribution at 50 A

采用 1:1.5 镜头成像到不锈钢薄板表面, 当输出功率为 200 W 时, 在氧气辅助下, 切割 1 mm 厚、尺寸为 20 mm × 26 mm 的不锈钢薄板。如图 10 所示, 激光切割对薄板边缘的热影响区为 0.3 mm 左右, 切面面形还有待切割工艺的进一步优化^[10-11]。另外, 进一步加大激光功率, 可切割更

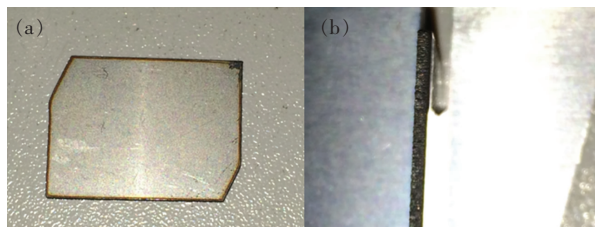


图 10 (a) 1 mm 不锈钢板切割样片; (b) 切面视图。

Fig. 10 (a) Sample of the stainless sheet with the thickness of 1 mm after laser cutting. (b) Cross section of the sheet cutted.

厚的不锈钢板。

5 结 论

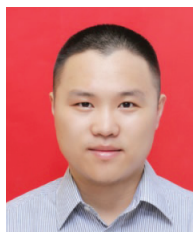
采用高光束质量的半导体激光线阵, 通过光束整形及偏振、波长系列合束方式, 并优化聚焦镜, 实现了近 400 W 连续功率、200 μm/NA 0.2 的光纤输出, 激光功率密度达到 1.23×10^6 W/cm²。在功率为 200 W 时, 采用该光源切割了 1 mm 厚的不锈钢薄板。通过优化工作条件, 该光源可满足更厚不锈钢板切割要求。另外, 耦合其他波长, 如 808 nm 和 880 nm 等, 可以进一步提高输出功率和功率密度, 满足对功率密度要求更高的场合。

参 考 文 献:

- [1] Voss M, Meinschien J, Bruns P, *et al.* High brightness fiber coupled diode lasers of up to 4-kW output power for material processing [J]. *SPIE*, 2012, 8241:824103-1-7.
- [2] Wolf P, Köhler B, Rotter K, *et al.* High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device [J]. *SPIE*, 2011, 7918:791800-1-9.
- [3] Heinemann S, Lewis B, Regaard B, *et al.* Single emitter based diode lasers with high brightness, high power and narrow linewidth [J]. *SPIE*, 2011, 7918:79180M-1-11.
- [4] Zhu H B, Zhang J S, Ma J, *et al.* 10 kW CW diode laser cladding sources [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2013, 21(4):829-833 (in Chinese).
- [5] 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.* (光学精密工程), 2013, 21(4):896-903 (in Chinese).
- [6] Zhang J, Peng H Y, Liu Y, *et al.* Fiber-coupled diode laser flexible processing source for metal sheet welding [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(8):895-900 (in Chinese).
- [7] 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.* (光学精密工程), 2013, 21(5):1137-1142 (in Chinese).
- [8] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. *High Power Diode Lasers Technology and Applications* [M]. New York: Springer, 2007:387-403.
- [9] Diehl R. *High-Power Diode Lasers: Fundamentals, Technology, Applications* [M]. Berlin: Springer-verlag, 2000: 313-315.
- [10] Ghany K A, Newishy M. Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd: YAG laser [J].

J. Mater. Process. Technol., 2005, 168(3):438-447.

- [11] Paul S S, Vinay S J. Analysis of heat-affected zone formation for laser cutting of stainless steel [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 1995, 53(3):879-892.



张俊(1986-),男,重庆渝北人,博士,助理研究员,2013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线阵合束及应用方面的研究。
E-mail: jzh_ciomp@163.com



彭航宇(1983-),男,浙江黄岩人,博士,副研究员,2011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合束及应用方面的研究。
E-mail: imphy@163.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》,双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN22-1400/04;国内外公开发行人,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- ★中国科技核心期刊
- ★中国光学学会会刊
- ★中国学术期刊(光盘版)源期刊
- ★万方数字化期刊全文数据库源期刊
- ★中国科技期刊数据库源期刊
- ★荷兰Scopus数据库源期刊
- ★美国《化学文摘》(CA)源期刊
- ★美国乌利希国际期刊指南(Ulrich LPD)源期刊
- ★俄罗斯《文摘杂志》(AJ)源期刊
- ★波兰《哥白尼索引》(IC)源期刊

报道内容:基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿,洽谈合作。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://www.chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn, zgxcn@126.com

联系电话: (0431)86176852; (0431)84627061 **传 真:** (0431)84613409

编辑部地址: 长春市东南湖大路3888号(130033)

《中国光学》编辑部