

## 半导体激光器双波长光纤耦合模块的 ZEMAX 设计

刘翠翠<sup>1,2</sup>, 王翠鸾<sup>1</sup>, 王鑫<sup>1,2</sup>, 倪羽茜<sup>1,2</sup>, 吴霞<sup>1</sup>, 刘素平<sup>1</sup>, 马骁宇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院半导体研究所 光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了发挥单管半导体激光器的优势, 获得光纤耦合模块多波长、高功率、高亮度的光束输出, 利用 ZEMAX 软件仿真模拟, 设计了一种单管光纤耦合模块。此模块将 32 支输出波长分别为 915 nm、975 nm, 输出功率为 15 W 的单管半导体激光器, 经过微透镜组快慢轴光束整形、空间合束、偏振合束、波长合束以及光束聚焦等一系列工艺后, 耦合进芯径 200  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤。模拟结果显示, 光纤输出功率 467.46 W, 光纤前后耦合效率大于 98.47%, 总耦合效率高于 97.39%, 光功率密度高于 12.86  $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ , 达到了泵浦激光器和功率型器件的性能要求。使用 Solidworks 软件设计了相应的底板结构, 并结合 ANSYS 软件进行散热模拟分析, 结果显示该模块散热性能良好, 可行性较高。

**关键词:** 半导体激光器; 光纤耦合; 激光合束; ZEMAX

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0105002

## Design of double wavelengths fiber coupled module of semiconductor diode laser by ZEMAX

Liu Cuicui<sup>1,2</sup>, Wang Cuiluan<sup>1</sup>, Wang Xin<sup>1,2</sup>, Ni Yuxi<sup>1,2</sup>, Wu Xia<sup>1</sup>, Liu Suping<sup>1</sup>, Ma Xiaoyu<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to make full use of the advantages of single emitter semiconductor diode laser and obtain a light beam of more wavelengths, higher power, higher optical power density, a fiber coupled diode laser module was designed, which consisted of 32 single emitter semiconductor diode lasers using incoherent multiplexing by ZEMAX. The wavelengths of semiconductor diode laser were 975 nm and 915 nm, the power was 15 W. After the simulation of fast axis collimation, slow axis collimation, spatial multiplexing, polarization multiplexing, wavelength multiplexing, focusing and fiber coupling, this module can produce 467.46 W from a standard optical fiber with core diameter of 200  $\mu\text{m}$  and numerical aperture (NA) of 0.22. The coupling efficiency before-after fiber was above 98.47%, the total coupling efficiency was above 97.39%. The optical power density was above 12.86  $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ , module can be used as

收稿日期: 2017-06-05; 修订日期: 2017-08-03

基金项目: 国家重点研究发展计划(2017YFB0405303)

作者简介: 刘翠翠(1993-), 女, 硕士生, 主要从事大功率半导体激光器方面的研究。Email: sissiliu@semi.ac.cn

导师简介: 马骁宇(1953-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大功率半导体激光器方面的研究。Email: maxy@semi.ac.cn

pump laser and high power device. The corresponding packaging structure was designed by Solidworks and its thermal performance was simulated by ANSYS. The final result demonstrates that this module plays a great heat dissipation performance and is of high feasibility.

**Key words:** semiconductor diode laser; optical fiber coupling; laser beam combining; ZEMAX

## 0 引言

半导体激光器凭借其光电转换效率高、体积小、寿命长、可靠性好、稳定性高等优点<sup>[1-3]</sup>,应用范围不断拓宽,逐渐由单一的光纤激光器、固体激光器等器件的泵浦光源器件发展为直接作用光源器件<sup>[4-5]</sup>。目前常用的半导体激光器包含单管半导体激光器、Bar 条半导体激光器以及半导体激光器阵列。

国内对于半导体激光器光纤耦合模块的研究虽起步较晚,但通过众多单位近 20 年的努力,也取得了重大的进展。半导体激光器光纤耦合模块的研制中常用的非相干合束技术包含三种:空间合束、波长合束、偏振合束<sup>[6]</sup>,非相干合束技术可增大光纤输出功率以及光功率密度。借助非相干合束技术的优势以及不断成熟的加工工艺水平<sup>[7]</sup>,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所于 2012 年应用偏振合束及空间合束等技术,将 24 支 808 nm 单管激光器的光束耦合进入芯径 300  $\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.22 的光纤,获得 8.5 A 下 162 W 的功率输出,耦合效率为 84%<sup>[8]</sup>。北京工业大学基于空间合束技术于 2016 年将 10 支半导体激光器阵列耦合进入芯径 400  $\mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.22 的普通光纤,70 A 电流下获得 518 W 的功率输出,光纤前后的耦合效率高于 95%<sup>[9]</sup>。

与 Bar 条及阵列相比,单管半导体激光器无“Smile 效应”,散热能力及稳定性更好,且寿命更长,成本更低<sup>[10]</sup>,因此单管半导体激光器的广泛应用有利于减少能源浪费、节省使用成本。但单支单管半导体激光器输出光功率较低,光束质量较差,不能直接应用到实际生产生活之中,一般会先采用光束整形、多管合束及光纤耦合等技术以优化光束<sup>[4]</sup>。如今,关于单管半导体激光器的最新研究成果显示其波长线宽可以小于  $\pm 3 \text{ nm}$ ,激光器偏振度达到 95%~98%,因此激光合束技术逐渐成为光纤耦合工艺中必不可少的步骤。

目前,国内外单管激光器光纤耦合模块的研究

方兴未艾,但对于单管波长合束及偏振合束的研究较少。而基于单管半导体激光器的优越性能,以及一种可为多种光纤激光器或固体激光器提供泵浦源的模块的设计目的,笔者所在课题模拟将多支不同波长的单管半导体激光器的光束耦合进入一根光纤,以获得高光功率密度及多波长的光束输出,此设计可极大地拓宽单管光纤耦合模块的应用范围。

## 1 基本原理

单管半导体激光器光发射区垂直于 PN 结方向(即快轴方向)尺寸较小,易达到衍射极限;而平行于 PN 结方向(即慢轴方向)尺寸可以达到快轴方向发光区尺寸的数百倍,不易达到衍射极限。这种特殊的结构导致其快轴方向远场发散角( $20^\circ \sim 60^\circ$ )远大于慢轴方向的远场发散角( $6^\circ \sim 20^\circ$ ),光束不完全对称<sup>[11-12]</sup>。如图 1 所示。

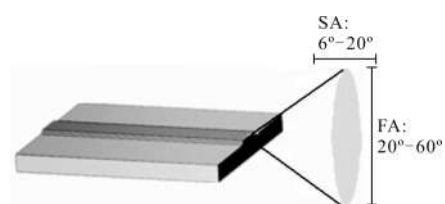


图 1 单管半导体激光器结构

Fig.1 Structure of single emitter semiconductor laser

单管半导体激光器光束质量较差,光功率及光功率密度较小,因此由多支单管组成光纤耦合模块是高效率应用单管半导体激光器的重要途径。此外,通过光纤输出光束的模块可改变光束的传播方向,使用方便,易于携带,因此光纤耦合模块被广泛用作固体激光器、光纤激光器的泵浦源。

文中仿真设计是利用 ZEMAX 光学设计软件光线追迹的原理,先于序列模式下通过控制变量法优化透镜参数,需要优化的参数包括透镜的材料、尺寸规格以及曲率半径等。然后再于非序列模式下进行

整体光路的组建。最终使用 Solidworks 工程制图软件设计模块模型,再利用 ANSYS 分析软件模拟模块的散热情况以分析模块的可行性。

ANSYS 软件基于热传导方程进行热分析,主要依据为傅里叶定律:

$$Q = -K \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为热流密度;  $K$  为导热系数;  $\frac{dT}{dx}$  为  $x$  方向的温度梯度,负号表示热量总向温度降低的方向传递。该软件原理基于有限元分析法,此方法常用于光电子器件热分析中。在文中模拟中,热源热功率近似为电功率与出光功率的差值。设定边界条件为恒定温度,即底板热沉恒定  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在实验中可使用恒温循环水控制底板温度,因此文中设定合理有效。

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 光束整形

该模拟中单管半导体激光器的光束参数均参照本课题组内自主设计生产的 GaAs 基单管半导体激光器,发光区尺寸为  $1.5\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ ,输出功率为  $15\text{ W}/16\text{ A}$ 。光束整形之前,其快轴光束远场发散角为  $50^{\circ}$ (95%),慢轴远场发散角为  $12.2^{\circ}$ (95%)。根据 ZEMAX 软件仿真结果,对光束快、慢轴整形所使用的透镜均为“D 型截面”的柱透镜。快轴透镜有效焦距为  $200\text{ }\mu\text{m}$ ,材料为 S-TIH53;慢轴透镜有效焦距为  $12.5\text{ mm}$ ,材料为 BK7。图 2 为光束整形示意图。

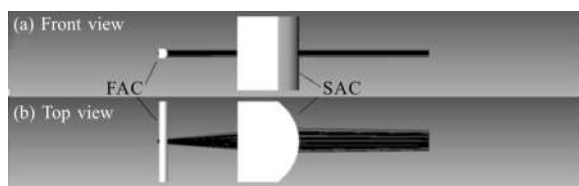
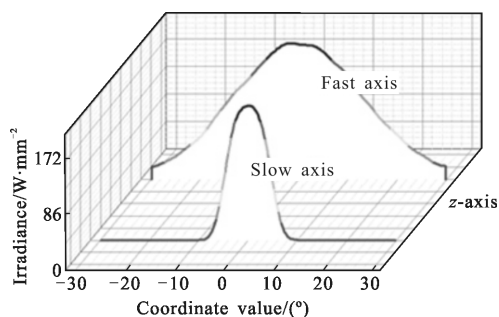


图 2 单管半导体激光器快慢轴光束整形示意图

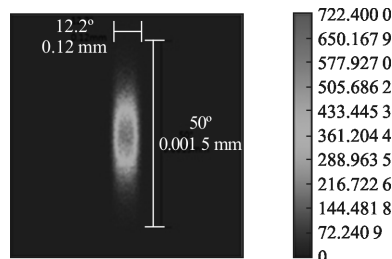
Fig.2 Fast-slow axis collimation of single emitter semiconductor lasers

由于  $915\text{ nm}$  与  $975\text{ nm}$  两种单管半导体激光器光束特性类似,文中计算均以  $915\text{ nm}$  激光器为例。由 ZEMAX 软件模拟分析得到整形之后的光发散角以及光斑如图 3 所示,可看出快慢轴光束整形之后的发散角在  $0.2^{\circ} \sim 0.3^{\circ}$ (即  $3.491 \sim 5.236\text{ mrad}$ ),光功率密度峰值较光束整形之前提高了一个数量级。



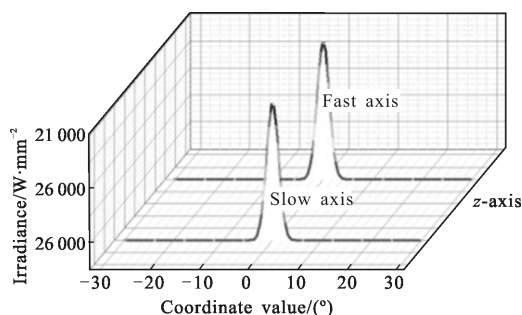
(a) 整形前的光发散角

(a) Divergence angle before collimation



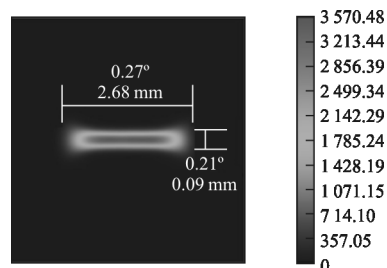
(b) 整形前的光斑

(b) Light spot before collimation



(c) 整形后的光发散角

(c) Divergence angle after collimation



(d) 整形后的光斑

(d) Light spot after collimation

图 3 光束整形前后快慢轴方向的光发散角及光斑

Fig.3 Divergence angle and light spot before and after collimation in the fast and slow axis

为了准确评价单管半导体激光器光束质量,控制光纤耦合模块中激光器的数量,以得到最大的模

拟耦合效率及输出功率，引入光参数积(Beam Parameter Product, BPP),其值为光束远场发散半角  $\theta$  与光束光斑半径  $\omega$  的乘积,即  $BPP=\omega \cdot \theta$ 。光束整形前后的光斑参数符合公式(2)、(3)<sup>[12]</sup>。

$$f = \frac{\omega_1}{\tan \theta_0} \quad (2)$$

$$\theta_1 = \arctan \left( \frac{\omega_0}{\omega_1} \tan \theta_0 \right) \quad (3)$$

式中: $f$ 为透镜焦距; $\omega_0$ 、 $\omega_1$ 分别为整形前后的光斑半径; $\theta_0$ 、 $\theta_1$ 分别为整形前后的远场发散半角。结合公式(2)、(3)计算激光器光束整形前后光参数积并整理成表 1。

表 1 单管半导体激光器光束整形前后的光参数积  
Tab.1 BPP of single emitter semiconductor laser before and after collimation

Parameter	Before	After
$\theta/\text{mrad}$	436.33	3.753
Fast axis $\omega/\text{mm}$	0.000 75	0.093
$BPP/\text{mm} \cdot \text{mrad}$	0.327	0.327
$\theta/\text{mrad}$	106.5	4.000
Slow axis $\omega/\text{mm}$	0.05	1.34
$BPP/\text{mm} \cdot \text{mrad}$	5.325	5.360
Fiber $BPP/\text{mm} \cdot \text{mrad}$		22

## 2.2 激光合束

在 ZEMAX 软件非序列模式下模拟得到模块光路结构如图 4 所示。该模块将 16 支 915 nm、16 支 975 nm 共 32 支单管半导体激光器的光束耦合进入芯径为 200  $\mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.22 的单根光纤之中。

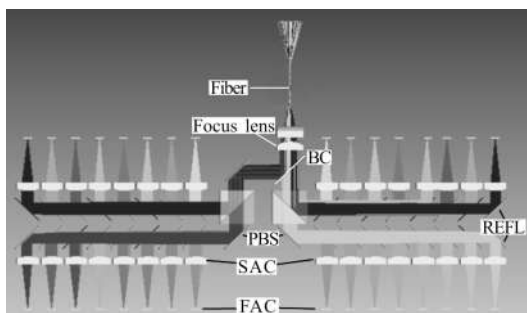


图 4 光纤耦合模块的光路结构

Fig.4 Optical structure of the fiber-coupled module

此模拟中每 8 支平行排列的单管激光器组成一个空间合束单元,其光斑如图 5 所示。每个空间合束

单元内的单管激光器为同一波长,同一偏振态。偏振合束镜的作用是将同种波长、不同偏振态的两束光合为一束偏振合束光。经反射镜改变光传播方向后,两束不同波长的偏振合束光的传播方向垂直。使用波长合束镜,可将此两束偏振合束光合为一束波长合束光。此时波长合束光光斑仍较大,再经聚焦透镜组聚焦,得到近似矩形的小光斑,其尺寸需小于光纤芯径。在焦点处使聚焦光束垂直于光纤端面入射,即完成光纤耦合工艺。

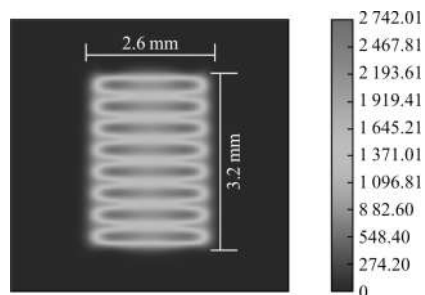


图 5 空间合束单元光斑图

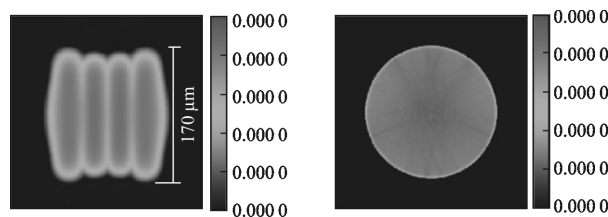
Fig.5 Light spot from the unit of spatial combining

整形后,光束快轴方向的尺寸约 0.27 mm,模拟空间合束单元内相邻阶梯热沉间的高度差为 0.4 mm,可以确保光束快轴方向不被遮挡,最大限度减小快轴方向叠加光束之间的空隙,保证光束的照度均匀性<sup>[13]</sup>。空间合束单元光束慢轴光参数积不变,快轴光参数积变为:

$$BPP_{\text{fast}} = \frac{3.2 \text{ mm}}{2} \times 3.75 \text{ mrad} = 6.005 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \quad (4)$$

## 2.3 聚焦及耦合

使用 ZEMAX 光学设计软件模拟得到的“平-凸”柱透镜组对光束快慢轴方向分别聚焦。聚焦后的焦点光斑如图 6(a)所示,图 6(b)为距光纤输出端面 10 mm 处的光斑。



(a) 聚焦后光斑

(b) 光纤输出光斑

(a) Light spot after focusing

(b) Light spot output by fiber

图 6 光纤耦合前后光斑

Fig.6 Light spot before and after fiber coupling

公式(5)、(6)为光纤耦合的几何条件:

$$d < \frac{D}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$BPP_{fast} < BPP_{slow} < \frac{BPP_{fiber}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

式中: $d$ 为焦点光斑尺寸; $D$ 为纤芯直径。经分析可知此光斑长边约 170  $\mu\text{m}$ , 因此模拟使用芯径为 200  $\mu\text{m}$  的光纤作为输出尾纤。

通过 ZEMAX 追迹探测功能得到光纤输出功率为 467.46 W, 光纤前后的耦合效率为 98.47%, 总光纤耦合效率为 97.39%。公式(7)为光功率密度的计算公式:

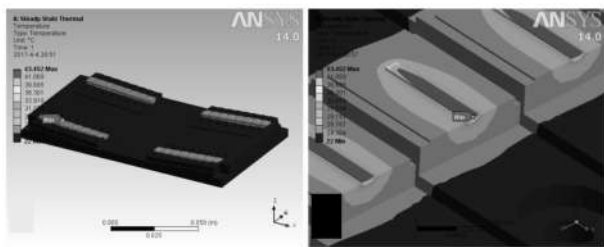
$$B = \frac{P}{\pi \frac{D^2}{4} \cdot \pi \theta} \quad (7)$$

式中: $B$ 为光功率密度; $P$ 为光纤输出光功率; $D$ 为光纤纤芯直径; $\theta$ 为光纤数值孔径角的一半。计算可得此设计模块的光纤输出功率密度高于 12.86  $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

### 2.4 散热分析

模块的散热性能决定模块的稳定性及使用寿命。根据 ZEMAX 模拟结果, 结合 SolidWorks 以及 ANSYS 对模块进行散热模拟及分析。

该设计模拟将 1 个散热热沉、32 个过渡热沉及 32 个 COS 封装的单管半导体激光器组成一个光纤耦合模块, 单管 16 A 下出光功率 15 W。阶梯式过渡热沉的使用便于模块的装配, 也可形成良好的散热通道。经 ANSYS 软件仿真得模块发热情况如图 7 所示, 在保持底板为恒温 22  $^{\circ}\text{C}$  的环境下发光 1 min 后, 模块局部峰值温度升至 43  $^{\circ}\text{C}$ , 在正常使用温度范围内。实际应用中可通过低温循环水冷却的方式为底板热沉带走热量, 使模块基板保持恒定低温, 因此该设计合理且模块具有一定可行性。



(a) 模块温度分析

(b) 局部放大

(a) Temperature analysis of the whole module (b) Local amplification

图 7 光纤耦合模块的热分析

Fig.7 Analysis of thermal performance of the fiber-coupled module

### 3 结论

文中方案运用 ZEMAX、Solidworks、ANSYS、Origin 等多种软件, 模拟设计了一种包含 32 支单管半导体激光器的光纤耦合模块, 且此模块可出射两种波长的激光光束。设计过程主要包含快慢轴整形透镜的设计、整体结构的设计、聚焦透镜的设计及基于模块散热情况的可行性分析。

设计中综合运用三种非相干合束技术, 较之单一合束技术, 大大提高了光纤耦合模块的输出功率及光功率密度。通过芯径为 200  $\mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.22 的尾纤, 得到 467.46 W 的输出光功率, 光纤前后耦合效率达 98.47%, 总耦合效率达 97.39%, 光功率密度达 12.86  $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ , 完成了常规泵浦光源器件的初始设计目的。

文中模块使用透镜数量少、成本低、体积小, 经模拟分析可得模块的散热性能优良, 具有实际应用的可能性。在进一步的工作中, 将通过实验来验证设计方案。

### 参考文献:

[1] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 189-194. (in Chinese)  
马晓宇, 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.

[2] Tong Cunzhu, Wang Lijie, Tian Sicong, et al. Study on Bragg reflection waveguide diode laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 480-498. (in Chinese)  
佟存柱, 汪丽杰, 田思聪, 等. 布拉格反射波导半导体激光器的研究[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 480-498.

[3] Liu Youqiang, Cao Yinhua, Li Jing, et al. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1279-1287. (in Chinese)  
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.

[4] Zhang Jun, Peng Hangyu, Wang Lijun. High power diode laser beam combining technology and applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3193-3197. (in Chinese)  
张俊, 彭航宇, 王立军. 半导体激光合束技术及应用[J]. 红

- 外与激光工程, 2012, 41(12): 3193-3197.
- [5] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517-534. (in Chinese)  
王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 517-534.
- [6] Ni Yuxi, Ma Xiaoyu, Jing Hongqi, et al. Finite element analysis of expansion-matched submounts for high-power laser diodes packaging[J]. *Journal of Semiconductors*, 2016, 37(6): 064005.
- [7] Zhu Hongbo, Li Yanhua, Hao Mingming, et al. Fiber coupled diode laser module for laser processing by polarization multiplexing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1137-1143. (in Chinese)  
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.
- [8] Zhu Hongbo, Hao Mingming, Peng Hangyu, et al. Module of fiber coupled diode laser based on 808 nm single emitters combination[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 1-5. (in Chinese)  
朱洪波, 郝明明, 彭航宇, 等. 基于 808 nm 半导体激光器单管合束技术的光纤耦合模块[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 1-5.
- [9] Xu Dan, Huang Xuesong, Jiang Menghua, et al. 500 W fiber-coupled semiconductor laser module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0606003. (in Chinese)  
徐丹, 黄雪松, 姜梦华, 等. 500 W 光纤耦合半导体激光模块[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0606003.
- [10] Wang Xin, Wang Cuiluan, Wu Xia, et al. Researching the 915 nm high-power and high-brightness semiconductor laser single chip coupling module [J]. *Journal of Semiconductors*, 2017, 38(2): 024006.
- [11] Jing Hongqi, Zhong Li, Ni Yuxi, et al. Design and simulation of a novel high-efficiency cooling heat-sink structure using fluid-thermodynamics [J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, 36(10): 122006.
- [12] Zhou Zepeng, Bo Baoxue, Gao Xin, et al. Fiber coupling design of high power semiconductor laser based on ZEMAX [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(9): 1208-1212. (in Chinese)  
周泽鹏, 薄报学, 高欣, 等. 基于 ZEMAX 高功率半导体激光器光纤耦合设计[J]. 发光学报, 2013, 34(9): 1208-1212.
- [13] Xia Xiaoyu, Gao Xin, Xu Liuyang, et al. Output far field characteristics of high power fiber coupling diode laser based on single emitter devices [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(2): 170-176. (in Chinese)  
夏晓宇, 高欣, 许留洋, 等. 基于单发光区芯片的大功率光纤耦合激光器的输出远场特征分析 [J]. 发光学报, 2017, 38(2): 170-176.