

# 974 nm 半导体激光器的光纤耦合研究

刘洋洋<sup>1</sup> 杨瑞霞<sup>1</sup> 袁春生<sup>2</sup> 王英顺<sup>2</sup> 安振峰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 河北工业大学信息工程学院, 天津 300401  
<sup>2</sup> 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

**摘要** 根据半导体激光器和单模光纤模场分布特点,用模式耦合理论研究了单模光纤与半导体激光器的耦合,结果表明将光纤端面制作成楔形微透镜可以使光纤与半导体激光器的耦合满足模场匹配和相位匹配的要求。用遗传算法对楔形光纤微透镜参数进行优化,得到楔角为  $88^\circ$ ,柱透镜半径为  $3.44 \mu\text{m}$ ,耦合距离为  $6.13 \mu\text{m}$  时耦合效率达到最佳值,用 Zemax 光学仿真软件对耦合模型进行仿真,得到耦合效率为  $88.9\%$ ,耦合好的模块经激光点焊及高低温环境测试后,得到最大耦合效率为  $81.36\%$ 。实验结果与仿真结果相差不大,耦合输出功率满足了作为光纤激光器种子源的功率要求。

**关键词** 激光器; 模式耦合; 遗传算法; 楔形透镜光纤; 耦合效率

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1102003

## Study on Fiber Coupling for 974 nm Semiconductor Laser Diode

Liu Yangyang<sup>1</sup> Yang Ruixia<sup>1</sup> Yuan Chunsheng<sup>2</sup> Wang Yingshun<sup>2</sup> An Zhenfeng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China  
<sup>2</sup> The 13<sup>th</sup> Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

**Abstract** According to the mode field distribution characteristics of semiconductor lasers and single mode fiber, the coupling of the single mode fiber and semiconductor laser is studied by the mode coupling theory, the results show that the fiber end face into a wedge micro lens can make the coupling of fiber and semiconductor laser meet the requirement of the mode field matching and phase matching. Micro lens parameters of wedge type fiber are optimized using the genetic algorithm, the result is that the coupling efficiency achieves the optimum value with wedge-angle of  $88^\circ$ , cylinder lens radius of  $3.44 \mu\text{m}$  and coupling distance of  $6.13 \mu\text{m}$ , the coupling efficiency reaches  $88.9\%$  when using the Zemax optical simulation software to simulate the coupling model, the maximum coupling efficiency is  $81.36\%$  after laser spot welding and the high and low temperature environment test. The experimental results are similar to the simulation results, the output coupling power can satisfy the demands of seed source power for fiber laser.

**Key words** lasers; mode coupling; genetic algorithm; wedge-lensed fiber; coupling efficiency

**OCIS codes** 140.3325; 140.3510; 140.5960

## 1 引 言

半导体激光器(LD)具有体积小、寿命长、光电转化效率高、可靠性高等突出优点,广泛应用于航空航天、医疗、军事等领域<sup>[1-2]</sup>。其与单模光纤(SMF)

的耦合可以作为光纤激光器的种子源,要求耦合模块稳定、可靠,这对两者耦合效率提出了很高要求<sup>[3]</sup>。对此,国外 nLight、Oclaro 等公司早在很多年前就开展了相关研究,并取得了重要成果,国内起

收稿日期: 2014-06-23; 收到修改稿日期: 2014-07-14

基金项目: 国家重大专项(2009ZX01005-001)

作者简介: 刘洋洋(1988—),女,硕士研究生,主要从事激光器与光纤耦合等方面的研究。E-mail: lyyang0424@163.com

导师简介: 杨瑞霞(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事电子材料、电子器件、集成电路设计制备和特性等方面的研究。E-mail: yangrx@hebut.edu.cn(通信联系人)

步较晚,从 20 世纪 80 年代开始,许多大学、研究所、公司(凯普林、西安炬光等)陆续开展半导体激光器与单模微透镜光纤的耦合研究工作,大部分研究成果停留在理论研究和实验室研究阶段,产品可靠性问题还未得到根本解决,这大大限制了单模耦合模块的发展,所以研究并生产出可靠、稳定的单模 LD 光纤耦合模块具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。

半导体激光器腔面束腰小,快慢轴发散角差别很大,出射光束在空间分布不对称,激光光束高度发散,半导体激光器这些固有结构上的特点对耦合效率影响很大<sup>[7-9]</sup>。为了得到高耦合效率,压缩快轴发散角,设计了楔形透镜光纤,用遗传算法对楔形光纤参数进行全局寻优,得到优化后的耦合模型,以此来指导实验,得到高耦合效率。

## 2 耦合原理及仿真结果

半导体激光器衍射光束如图 1 所示,  $x$  方向为光束传输快轴方向,  $y$  方向为光束传输慢轴方向,远场光斑呈椭圆形。光束快轴方向发散角( $\theta_{\perp}$ )为  $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ,慢轴方向发散角( $\theta_{\parallel}$ )为  $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ,这给高效率耦合带来了很大困难<sup>[10-11]</sup>。

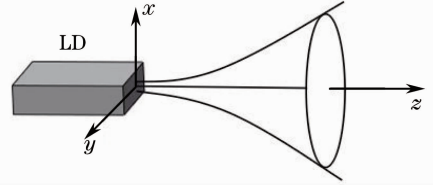


图 1 半导体激光器光束图

Fig. 1 Semiconductor laser beam

根据平端单模光纤模场与半导体激光器模场在快慢轴方向的交叠积分<sup>[12]</sup>,可得到耦合效率公式为

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(x, y, z) E_f(x, y)^* dx dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E_1(x, y, z)|^2 dx dy \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E_f(x, y)|^2 dx dy}, \quad (1)$$

式中  $E_1$  为半导体激光器基模模场形式,

$$E_1(x, y, z) =$$

$$\exp(-ikz) \left[ \frac{\omega_{ax}\omega_{ay}}{\omega_x(z)\omega_y(z)} \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{\omega_{ax}^2} - \frac{y^2}{\omega_{ay}^2}\right) \exp\left\{-ik\left[\frac{x^2}{2R_x(z)} + \frac{y^2}{2R_y(z)}\right]\right\} \exp\left[i\frac{\phi_x(z) + \phi_y(z)}{2}\right], \quad (2)$$

式中  $\omega_x(z), \omega_y(z)$  分别为激光光束传输到  $z$  处快、慢轴方向的光斑半径

$$\omega_x(z) = \omega_{ax} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_{ax}^2}\right)^2},$$

$$\omega_y(z) = \omega_{ay} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_{ay}^2}\right)^2},$$

$R_x(z), R_y(z)$  为激光光束传输到  $z$  处快、慢轴方向的曲率半径

$$R_x(z) = z \left[ 1 + \left(\frac{\pi\omega_{ax}^2}{\lambda z}\right)^2 \right],$$

$$R_y(z) = z \left[ 1 + \left(\frac{\pi\omega_{ay}^2}{\lambda z}\right)^2 \right],$$

$\phi_x(z), \phi_y(z)$  为激光光束传输到  $z$  处快、慢轴方向的相位变化

$$\phi_x(z) = \arctan\left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_{ax}^2}\right),$$

$$\phi_y(z) = \arctan\left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_{ay}^2}\right),$$

$\omega_{ax}, \omega_{ay}$  为在腔面处  $x$  和  $y$  方向的束腰,  $\lambda$  为自由空间传播波长,  $k$  为波矢量,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  ( $\lambda = 974 \text{ nm}$ ),  $E_f(x,$

$y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_f^2}\right)$  为平端光纤模场分布,  $\omega_f$  为模场半径。

### 2.1 半导体激光器与平端单模光纤耦合

用 Matlab 对耦合效率公式(1)式进行分析,得到传输距离与耦合效率之间的关系如图 2 所示。

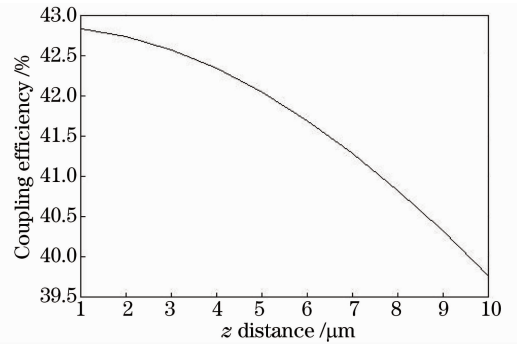


图 2 不同传输距离处的耦合效率

Fig. 2 Coupling efficiency of different transmission distance

从图 2 可以看出,平端光纤与半导体激光器直接耦合,在一定传输距离内,耦合效率约为 42%,耦合效率很低,这是由于两者模场不匹配造成的;随着

传输距离的增加,两者模场接近匹配,但是耦合效率不断下降,这是由两者相位失配造成的<sup>[12]</sup>。为了满足模式耦合要求,考虑对平端光纤端面进行改进,做成楔形,压缩激光器快轴发散角,改变激光光束在光纤中的模场形式,矫正光纤与激光器的波前失配,提高耦合效率<sup>[12-13]</sup>。

### 2.2 半导体激光器与单模楔形透镜光纤耦合

楔形透镜光纤就是将垂直于 pn 结方向的光纤端面经研磨、抛光等方法加工成楔形,做出楔角,然后在楔角顶端弧光放电制作出微透镜,微透镜起到相位变换的作用,能减小激光高度发散带来的 LD 与 SMF 波前相位失配<sup>[10]</sup>。图 3 为用 Solidworks 制作的 LD 与 SMF 耦合模型。图 4 为耦合模型在  $x$  和  $y$  方向上的投影。

设  $t(x) = \exp[-ik(n-1)Z_c(x)]$  为楔形透镜带来的相位变化,  $Z_c(x)$  为楔形透镜的表面轮廓函数,

$$\text{当 } |x| \leq r \cos \theta \text{ 时, } Z_c(x) = r - \sqrt{r^2 - x^2},$$

$$\text{当 } |x| \geq r \cos \theta \text{ 时, } Z_c(x) = r(1 - \sin \theta) + (|x| - r \cos \theta) \cot \theta,$$

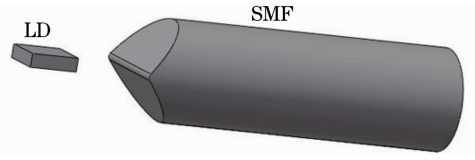


图 3 半导体激光器与楔形透镜光纤耦合模型  
Fig. 3 Coupling model of semiconductor laser and wedge-lensed fiber

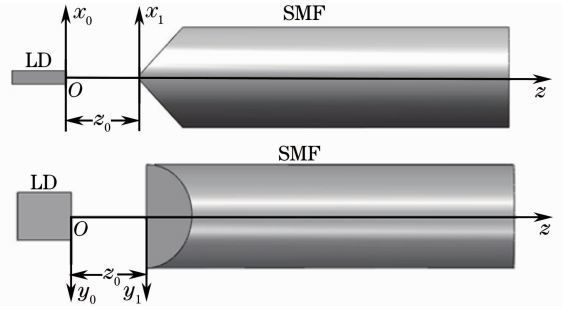


图 4 耦合模型在  $x, y$  方向的投影

Fig. 4  $x$  and  $y$  direction projection of the coupling model  
 $n = 1.464$  为纤芯折射率,  $\theta$  为半楔角,  $r$  为光纤顶端柱透镜半径。此时耦合效率公式可以转化为

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(x, y, z) [E_t(x, y)t(x)]^* dx dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E_1(x, y, z)|^2 dx dy \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E_t(x, y)t(x)|^2 dx dy} \quad (3)$$

从(3)式可以看出,耦合效率的大小与光纤结构密切相关,楔形光纤的楔角和柱透镜半径直接影响耦合效率,而空间传输距离  $z$  也与耦合效率有直接关系,所以要想得到高的耦合效率,必须得到  $\theta, r, z$  的最优值。用穷举法进行分析,方法相对简单,但是针对(3)式这种复杂的积分形式,既耗时又费力,还要对三个参数进行分别优化,为此提出了用遗传算法进行优化分析,同时得到  $\theta, r, z$  的最优值。

### 3 遗传算法优化设计

遗传算法是从遗传理论和生物进化论演化而来的,它可以解决复杂的非线性和多变量寻优问题<sup>[14]</sup>。通过初始群体产生、染色体编码、适应度计算、选择运算、交叉运算、变异运算、终止条件判断等步骤对多变量问题进行寻优计算<sup>[14]</sup>。

本研究用 Matlab 遗传算法对  $\theta, r, z$  三个变量进行同时优化,将自变量编码为二值符号串,以此完成选择、交叉、变异等二值运算。群体大小设为 20,字符串长度为 40(其中  $\theta$  长度为 26,  $r$  长度为 4,  $z$  长

度为 10),适应度函数为耦合效率函数[(3)式],以耦合效率函数的最大值作为优化目标,用比例选择法选出适应度较高的个体进行遗传,以交叉概率 0.6,变异概率 0.01 对遗传个体进行择优,经过 50 次迭代运算,得到三个自变量的全局最优值点为  $\theta = 44^\circ, r = 3.44 \mu\text{m}, z = 6.13 \mu\text{m}$ 。在实际工作中,半楔角  $\theta$  圆整为  $45^\circ$ ,柱透镜半径  $r$  圆整为  $3.5 \mu\text{m}$ 。

为了方便看出  $\theta, r, z$  与耦合效率的关系,建立耦合模型,指导实验研究,图 5 分别给出了耦合效率随  $\theta, r, z$  的变化曲线。

从图 5 可以看出,用遗传算法优化光纤参数,将高斯光束作为激光器光束近似处理,未考虑高阶模影响和光纤端面反射等光线损耗,得到了超过 90% 的耦合效率。图 5 中对于每一个变量而言,都能找到耦合效率取极大值的点,一旦确定了楔形光纤楔角和柱透镜半径,耦合效率就只与传输距离  $z$  有关,这就要求在实际生产中,通过五维微调架的细微调节,精确控制光纤端面与激光器腔面的工作距离,以此得到最大的输出功率。

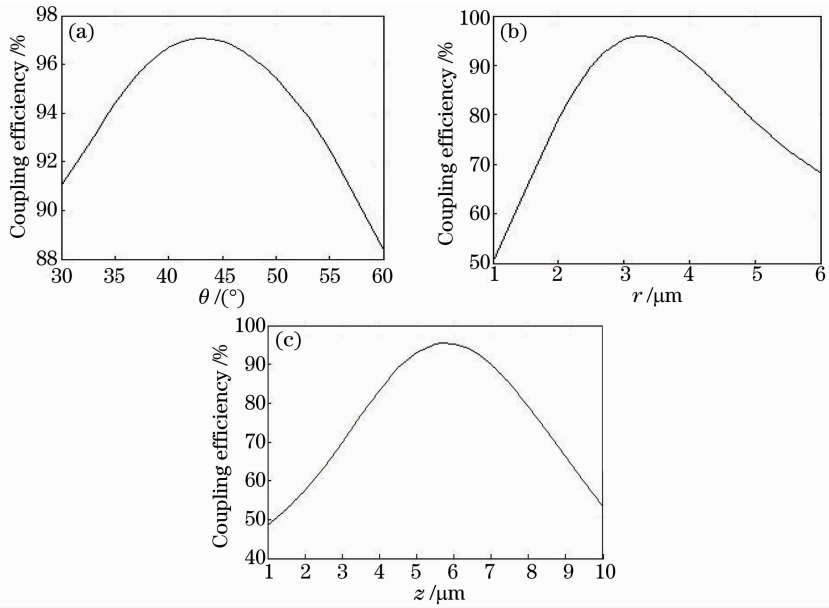


图 5 耦合效率随光纤参数的变化曲线。(a) 耦合效率与  $\theta$  的关系; (b) 耦合效率与  $r$  的关系; (c) 耦合效率与  $z$  的关系  
 Fig. 5 Coupling efficiency with the fiber parameter change. (a) Coupling efficiency versus  $\theta$ ; (b) coupling efficiency versus  $r$ ; (c) coupling efficiency versus  $z$

根据  $\theta = 45^\circ$ ,  $r = 3.5 \mu\text{m}$  的设计参数, 用 Solidworks 设计出楔形透镜光纤模型, 添加到 Zemax 中, 设置光源为 Source Two angle, 显示光线数目为 2000, 分析光线数目为 50000, 将楔形光纤纤芯和包层模型添加进去, 在距离光纤尾端  $10 \mu\text{m}$  处添加  $8 \mu\text{m}$  宽的方形 Detector surf 探测器, 观察经微透镜传输到纤芯中的激光光束。图 6 为探测器接收到的光斑图像, 从图 6 可以看出, 光源功率为 1 时, 探测器接收到的功率为 0.889, 耦合效率为 88.9%。

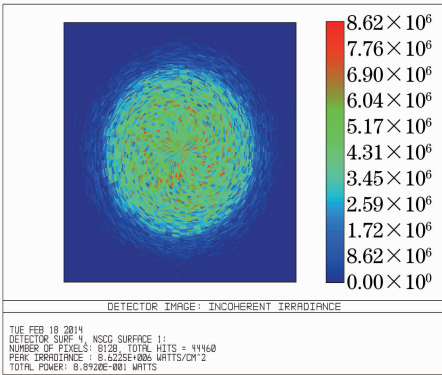


图 6 光纤端面处的光斑图  
 Fig. 6 Spot diagram of fiber end face

#### 4 耦合实验结果

实验所用半导体激光器为 974 nm 脊波导半导体激光器, 特殊的脊型结构可抑制光场高阶模, 实现基模的可靠传输。实验所用光纤为康宁 HI1060 单

模光纤, 端面镀增透膜, 减小非涅耳反射带来的光损耗。如图 7 所示, 光纤用夹具夹持固定在五维微调架上, 保持楔面与工作台的水平关系, 光纤尾端接在功率计上, 通过五维微调架的细微调节, 功率计上显示输出功率, 此功率与激光器芯组输出功率的比值就是耦合系统的耦合效率。

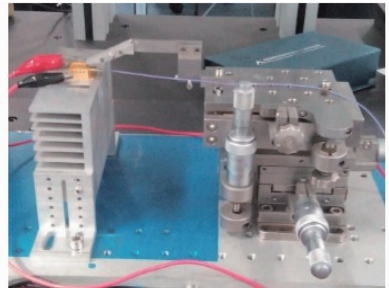


图 7 耦合实验平台

Fig. 7 Coupling experiment platform

图 8 为半导体激光器芯片与楔形光纤端面对准

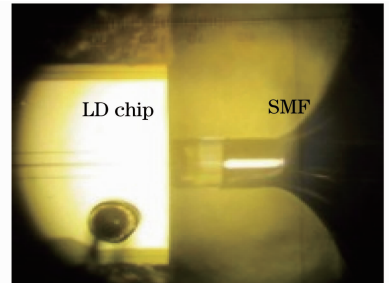


图 8 激光器芯片与楔形光纤的对准

Fig. 8 Alignment of laser chip and wedge fiber

时在显微镜下观察到的图像。芯片阈值电流为 12 mA, 实验所加电流为 100 mA, 微调架精度为  $0.5 \mu\text{m}$ , 当  $\theta$  和  $r$  确定时, 通过精确调节  $z$ , 得到了耦合效率随传输距离的变化曲线, 如图 9 所示。

图 9 分别显示了理论上遗传算法优化的耦合效率曲线和实验耦合效率曲线, 从图中可以看出, 两条曲线变化趋势一致, 只是耦合效率值之间存在差异, 实验时传输距离取  $6 \mu\text{m}$  耦合效率达到最大值, 与遗传算法得到的  $6.13 \mu\text{m}$  很接近, 这也证实了遗传算法优化参数的准确性。在此基础上, 进行了多次耦合实验, 记录了 5 组耦合系统输出功率值, 如表 1 所示。

表 1 耦合实验输出功率

Table 1 Output power of coupling experiment

Group	Wavelength /nm	LD output power /mW	Output power after coupling /mW	Coupling efficiency /%	Output power after welding /mW	Coupling efficiency /%
1	973.9	90.15	75.7	83.97%	72.44	80.35%
2	974.3	90.89	74.83	82.33	72.25	79.49
3	974.1	90.29	73.35	81.24	70.53	78.11
4	974.3	87.93	74.53	84.76	69.83	79.42
5	973.9	91.7	79.19	86.36	75.07	81.86

半导体激光器与光纤耦合实验, 要先进行芯组测试, 记录每个芯组的波长和 100 mA 电流下激光器出射功率, 然后进行耦合实验, 最后进行激光焊接固定光纤。从表 1 可以看出, 耦合系统最大耦合效率可调到 86.36%, 但是经激光焊接进行固定后, 耦合效率只有 81.86%, 这是由激光点焊带来的热应力引起的。焊接后的模块要进行温度实验以检验耦合系统的稳定性。实验条件为: 高低温 ( $-55 \text{ }^\circ\text{C} \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 循环 10 次, 高温储存 24 h。图 10 为每组温度实验前后耦合效率的变化。从图 10 可以看出, 温度实验后耦合效率有不同程度的变化, 有的降低, 例如第 1, 3, 4, 5 组, 平均降低了 1.12%, 第 2 组反而升高了, 其中最高耦合效率下降为 81.36%。温度实验前后耦合效率变化量不大, 这也证实了耦合模

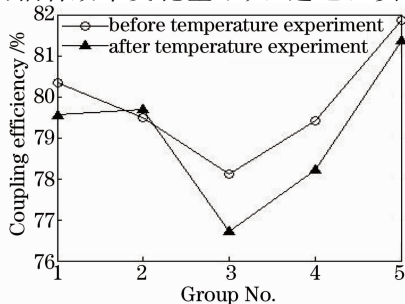


图 10 温度实验前后耦合效率

Fig. 10 Coupling efficiency before and after temperature experiment

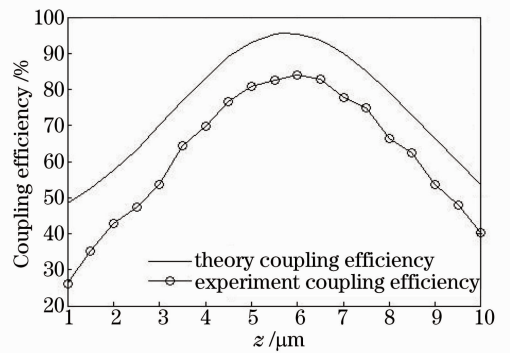


图 9 耦合效率与传输距离关系

Fig. 9 Coupling efficiency versus transmission distance

块相对稳定, 能适应高低温环境。

虽然耦合实验最高耦合效率可以达到 81.36%, 但是与 Zemax 得到的 88.9% 的耦合效率还有一定差距, 原因主要在于: 将高斯光束作为半导体激光器传输光束进行处理, 而实际模场形式很复杂; 耦合系统一旦经激光点焊进行固定, 激光点焊带来的热应力会引起光纤位置偏移, 这就需要不断地补点, 以达到焊接前的输出功率。

实验最高耦合效率可达到 81.36%, 但与国外 Oclaro 等公司高于 90% 的耦合效率还存在一定差距, 究其原因, 半导体激光器发散角的影响是一方面, Oclaro 公司芯片快轴发散角小于  $30^\circ$ , 实验芯片快轴发散角为  $38.8^\circ$ , 高的快轴发散角对耦合效率有很大影响; 除此以外, 焊接工艺、光纤端面制作工艺对耦合效率也有一定影响。在接下来的工作中, 要改变工艺参数, 优化焊接工艺, 得到更高的耦合效率, 应用于更多的领域。

## 5 结 论

对半导体激光器与楔形透镜光纤耦合模型进行设计, 结果表明耦合系统同时满足模场匹配和相位匹配时, 耦合效率比较高, 实验用 974 nm 半导体激光器与单模楔形透镜光纤耦合, 在 100 mA 电流下, 达到了最高 81.36% 的耦合效率, 满足了作为光纤



激光器种子源的功率要求。用遗传算法解决多变量寻优问题,虽然编写程序复杂,但是可以同时得到三个自变量的优化值,优化结果相对准确。在今后的工作中,要对激光点焊带来的热应力问题进行研究,找到合适的焊接功率和脉冲宽度,一次成型完成光纤固定,得到稳定、可靠的耦合模块。

### 参 考 文 献

- 1 H Nasim, Y Jamil. Diode laser: From laboratory to industry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 211–222.
- 2 Zhou Minchao, Jiang Xianfeng, Zhang Lifang, *et al.*. Optical performance of high power laser diode stack [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1202004.  
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.
- 3 H Tang, Q Zhang. Cylindrical lensed fiber optimized for 980 nm pump laser diode coupling[C]. *SPIE*, 2002, 4905: 157–160.
- 4 Wang Qiming. Breakthroughs and developments of semiconductor laser in china[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(9): 2190–2197.  
王启明. 中国半导体激光器的历次突破与进展[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2190–2197.
- 5 Wang Huolei, Kong Liang, Pan Jiaoqing, *et al.*. Recent progress of semiconductor mode-locked lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050001.  
王火雷, 孔亮, 潘教青, 等. 半导体锁模激光器的最新研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050001.
- 6 Zhu Hongbo, Hao Mingming, Peng Hangyu, *et al.*. Module of fiber coupled diode laser based on 808 nm single emitter combination[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0502001.  
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): 0502001.
- 7 R Fardz, H Shiraz, K Takahashi, *et al.*. Analysis of light reflections on the coupling efficiency of a laser diode to a conically lensed single-mode fiber[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, 24(4): 254–258.
- 8 M Thual, P Chanclou, O Gautreau. Appropriate microlens to improve coupling between laser diodes and single mode fibers[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(21): 1504–1506.
- 9 Yang Xiwen, Zhu Shengxiang, Jiang Rui, *et al.*. Study of diode laser coupling to a wedge-shaped fiber-optical [J]. *Micronanoelectronic Technol*, 2007, (10): 960–963.  
杨修文, 祝生祥, 江锐, 等. 楔形光纤与半导体激光器的耦合研究[J]. *微纳电子技术*, 2007, (10): 960–963.
- 10 Y Ma, F Xie. Design of a tapered lens for semiconductor laser to single-mode fiber coupling[J]. *Chinese J Semiconductors*, 2004, 25(11): 1355–1359.
- 11 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, *et al.*. Study on beam shaping of high power diode lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0202010.  
彭航宇, 顾媛媛, 单肖楠, 等. 大功率半导体激光光束整形技术研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0202010.
- 12 H Kubota, T Morioka. Few-mode optical fiber for mode division multiplexing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, 17(5): 490–494.
- 13 J Y Hu, C P Lin, S Y Hung, *et al.*. Semiellipsoid microlens simulation and fabrication for enhancing optical fiber coupling efficiency[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 147(1): 93–98.
- 14 X S Yang. Genetic algorithms [M]. // *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 2014. 77–87.

栏目编辑: 胡冰