

# 基于偏振折叠的光纤耦合实验研究

谭昊<sup>1,2</sup>, 郭林辉<sup>1,2</sup>, 高松信<sup>1,2</sup>, 李建民<sup>1,2</sup>, 尹新启<sup>1,2</sup>, 武德勇<sup>1,2</sup>, 唐淳<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**基于二极管激光器 mini-bar 的光纤耦合方式是一种降低耦合系统成本并提高整体转换效率的方法。提出一种偏振折叠的光束整形方式,并采用一种 CW 50 W mini-bar 进行了相关耦合系统的设计。针对 mini-bar 的特殊结构与散热需求,设计了针对 mini-bar 封装用的特种微通道冷却器,并通过封装实验结果验证设计有效。将 10 片封装在铜微通道冷却器上的 CW 50W mini-bar 组装成两列各 5 bar 的叠阵,实现了两列叠阵的激光束沿快轴方向的空间合成,合成后输出功率 439 W,空间耦合效率 97%。根据耦合系统的设计进行了 400 $\mu$ m 芯径、0.22 NA 的光纤耦合实验,得到光纤输出端脉冲激光功率 186.9 W,整体光光效率为 52.2%。

**关键词:**二极管激光器; mini-bar; 偏振折叠; 空间叠加; 光纤耦合

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.002

## Experimental study on fiber coupling based on polarization folding

TAN Hao<sup>1,2</sup>, GUO Lin-hui<sup>1,2</sup>, GAO Song-xin<sup>1,2</sup>, LI Jian-min<sup>1,2</sup>, YIN Xin-qi<sup>1,2</sup>, WU De-yong<sup>1,2</sup>, TANG Chun<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. The Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Fiber coupled system based on mini-bar is an effective way for avoiding complex beam shaping to reduce the costs and improve brightness. A beam shaping method named polarization folding is designed to reduce BPP of slow axis to a half, and the fiber coupling scheme based on polarization folding is also given. A microchannel heatsink is designed for the special demand of mini-bar package, and it had been proved according to the result of packaging experiment. 439 W output power of mini-bar spatial coupling module and 97% spatial coupling efficiency are achieved by spatial coupling of two 5 mini-bar stacks. A peak power of 186.9 W is achieved in the fiber coupling experiment, the O-O efficiency is about 52.2%.

**Key words:** diode laser; mini-bar; polarization folding; spatial coupling; fiber coupling

### 1 引言

光纤耦合输出的二极管激光器 (diode laser, DL) 模块具有结构紧凑、亮度高、可靠性高等特点,在泵浦光纤激光器、材料处理、医疗仪器等领域都获得了广泛的应用。通常这种激光器都采用标准线阵二极管激光器 (cm-bar),但由于其慢轴方向的光束质量较差,无法直接耦合进入光纤,需要对其光束进行切割重排,以平衡快慢轴的光束质量,并满足光纤束参积 (beam parameter product, BPP) 的要求。

如此造成耦合系统整体结构复杂、成本较高、效率较低,且难以满足光纤激光器与材料处理等应用中的亮度要求。为解决这个问题,实验采用发光单元 (emitter) 的尺寸、个数、腔长与周期 (pitch) 经过

**基金项目:**国家自然科学基金重大项目 (No. 60890201); 中物院应用电子学研究所自研课题 (No. 2011JGZY05); 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金 (No. HEL2013-11) 资助。

**作者简介:**谭昊 (1985-), 男, 博士, 主要从事二极管激光器及应用技术研究。E-mail: tanhaomf@163.com

**收稿日期:** 2013-08-26

特别设计的 mini-bar,其慢轴方向的光束发散角相对较小,宽度较窄,改善了器件在慢轴方向的光束质量,避免了厘米 bar 在光纤耦合中需要采用复杂光束整形系统这一缺陷,在效率与成本方面都具有较大优势。

## 2 耦合设计

### 2.1 耦合设计原则

要实现二极管激光的高效光纤耦合,需要关注 DL 的结构与发光辐射特性、封装技术以及在其与光纤之间的一系列光学系统。通常情况下一个 DL 光纤耦合系统结构组成如图 1 所示。

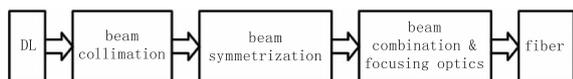


图1 耦合系统结构示意图

Fig.1 Scheme of a fiber coupling system

根据拉格朗日不变量可知,光束经过无像差的光学系统,其发散角与束腰会发生改变,但是两者乘积保持不变,因此使用二极管激光的 BPP 与光纤的 BPP 进行比较则可判断光束是否能被耦合进入光纤。

在光纤耦合设计中,DL 光束的 BPP 必须满足:

$$\sqrt{Q_{fast}^2 + Q_{slow}^2} < Q_{fiber} \quad (1)$$

$$Q = BPP = \omega_0 \cdot \theta_0 / 2 = \text{const.} \quad (2)$$

式中, $Q_{fast}$  为快轴的 BPP; $Q_{slow}$  为慢轴的 BPP; $Q_{fiber}$  为光纤可接收的最大 BPP; $\omega_0$  为 DL 的光束束腰半径; $\theta_0$  为光束的远场发散全角。并且  $Q_{fast}$  与  $Q_{slow}$  须尽可能一致。

考虑到 DL 的输出特性,首先根据 mini-bar 慢轴方向的 BPP,确定快轴方向芯片的数量,使快慢轴 BPP 尽量一致。其次,根据光束快轴与慢轴方向上的远场发散角与束腰,设计慢轴扩束与聚焦光学系统,其原则是慢轴扩束后光束的发散角与束腰尽可能与快轴相一致。最后,根据具体应用需求,考虑采用空间耦合、偏振合束与波长叠加的方式进一步提高系统输出功率。

### 2.2 基于偏振折叠的光纤耦合系统设计

为实现 0.22 NA、400  $\mu\text{m}$  芯径的光纤大于 150 W 的激光输出。实验选用 CW 50 W mini-bar 进行设计。这种 mini-bar 的 emitter 宽度为 90  $\mu\text{m}$ , pitch 为 500  $\mu\text{m}$ ,腔长为 3.6 mm,emitter 个数为 10,输出光束慢轴发散角 6°,波长为 980 nm。可以计算出 CW 50 W mini-bar 慢轴方向的 BPP 为 28.75 mm · mrad,设计采用偏振折叠的光束整形法缩小慢轴方向的

BPP,满足光纤芯径的要求。采用叠阵封装形式,微通道冷却器厚 1.8 mm,通过空间耦合的方式进一步提高输出功率,如图 2 所示。

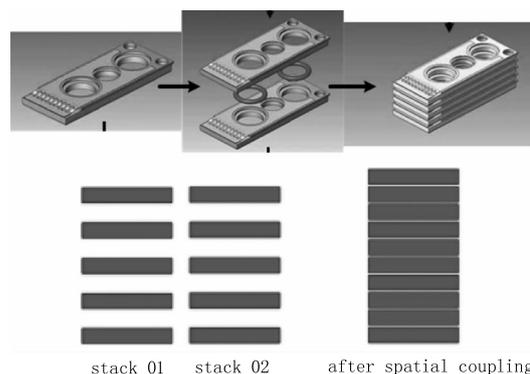


图2 DL 叠阵与空间耦合示意图

Fig.2 Scheme of DL stack and spatial coupling

在实际封装过程中,由于芯片焊接与堆叠等封装工艺的限制,需要引入各种误差考虑:堆叠引入的慢轴指向性偏差  $\pm 0.05^\circ$  及芯片焊接时的定位误差  $\pm 0.3 \text{ mm}$ ;偏振折叠中,分光后两束光的指向偏差  $\pm 0.1^\circ$  与光瞳偏差  $\pm 0.3 \text{ mm}$ ;空间耦合引入的两列叠阵之间的快慢轴指向偏差  $\pm 0.05^\circ$ ,慢轴方向光瞳偏离值  $\pm 0.3 \text{ mm}$ 。计算得到快轴方向最多可以堆叠 5 片 mini-bar,空间耦合后快轴方向 BPP 为 25.26 mm · mrad,慢轴方向 BPP 为 24.75 mm · mrad。根据式(1)计算可知,要实现此空间叠加模块的光纤耦合,对应 0.22 NA 的光纤其芯径不能小于 319  $\mu\text{m}$ 。可以将空间叠加后的光束耦合进入 0.22 NA、400  $\mu\text{m}$  芯径的光纤。系统的结构示意图如图 3 所示。

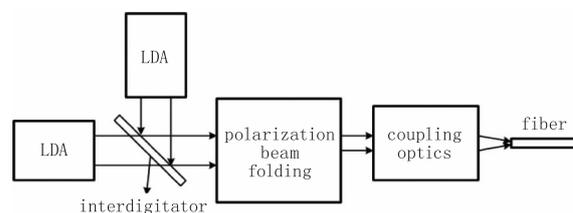


图3 基于偏振折叠的光纤耦合光路原理示意图

Fig.3 Scheme of a fiber coupling system based on polarization folding

## 3 mini-bar 封装设计与实验

### 3.1 mini-bar 封装设计

与厘米 bar 相比,mini-bar 特殊的结构使其腔长约为厘米 bar 的两倍,且腔面输出光功率密度比厘米 bar 的高,微通道冷却器需具有更强的散热能力,特别是沿腔长方向上的散热能力,因此需要针对 mini-bar 的特殊需求设计新型的高效冷却器。

考虑到实际加工难度,实验所使用的铜微通道

冷却器采用6层结构设计,每层厚0.3 mm,整体长28.5 mm,宽11.8 mm,微通道宽100 μm,微通道肋片宽200 μm,其结构如图4所示。设微通道冷却器中冷却水的流量为0.35 L/min,温度为25℃,设mini-bar电-光转换效率为60%,且热功率均匀分布在10个emitter上,采用ANSYS进行计算,得到mini-bar输出光功率50 W时的温度分布如图5所示。

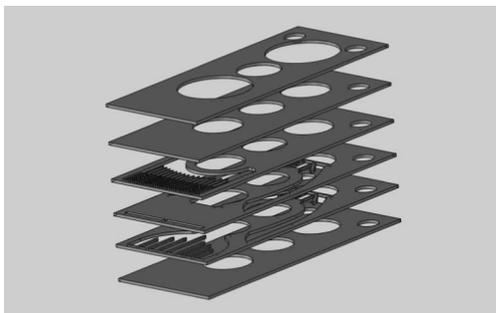


图4 微通道冷却器结构

Fig.4 Schematic illustration of microchannel heat sink structure

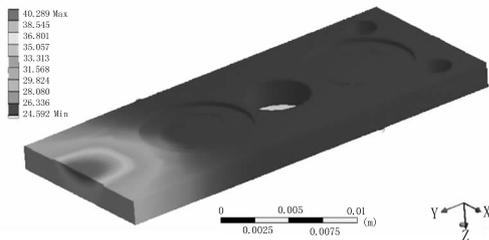


图5 温度分布

Fig.5 Temperature distribution of diode laser heat sink design

芯片激活区相对于冷却水的热阻  $R_{thermal}$  可以由

$$R_{thermal} = \frac{\Delta T}{\Delta Q} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta Q} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \lambda} \quad (3)$$

进行计算。可以看出 CW 50 W mini-bar 工作时结区温度约为 40.3℃,根据式(3)计算得到芯片激活区相对于冷却水的热阻为 0.47 ℃/W。

3.2 mini-bar 封装实验与性能测试

CW 50 W mini-bar 的封装实物如图6所示。驱动电流为 CW 50 A 时测得 CW 50 W mini-bar 的 P-I-E 曲线如图7所示,其斜率效率约为 1 W/A,电-光转换效率最大为 62.2%,中心波长为 975.85 nm,光谱半高宽约为 3.66 nm。慢轴远场发散角为 5.8° (FW1/e<sup>2</sup>)。

在加载连续电流的条件下,测得不同温度下阈值电流的变化。热沉温度从 15℃ 增加到 30℃ 时, CW 50 W mini-bar 的阈值电流从 3.82 A 增加到 4.1 A。在加载 1% 占空比(Duty Cycle, DC)准连续电流的条件下,测得 mini-bar 的中心波长随温度的变化曲线与加载连续电流的条件下中心波长随芯片

热功率变化,得到 CW 50 W mini-bar 的  $\Delta\lambda/\Delta T = 0.336 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,  $\Delta\lambda/\Delta Q = 0.178 \text{ nm}/\text{W}$ ,由式(3)可以计算出芯片激活区相对于冷却水的热阻  $R_{thermal} = 0.530 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ ,中心波长漂移 5.8 nm,结区温度 42.3℃。与理论计算结果较为一致。

根据设计,将 10 片 CW 50 W mini-bar 组装为 5 bar × 2 的 CW 50 W mini-bar 空间耦合叠阵,如图8所示。驱动电流为 CW 50 A 时测得其输出功率 439 W,空间耦合效率 97%。



图6 铜微通道热沉封装的 CW 50W mini-bar

Fig.6 Mini-bar mounted on microchannel heatsink

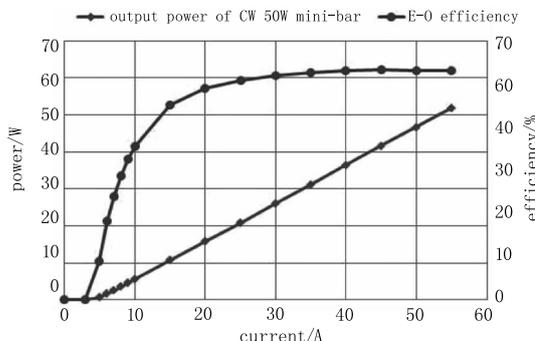


图7 CW 50W Mini-bar 的 P-I-E 曲线

Fig.7 P-I-E curve of CW 50W mini-bar

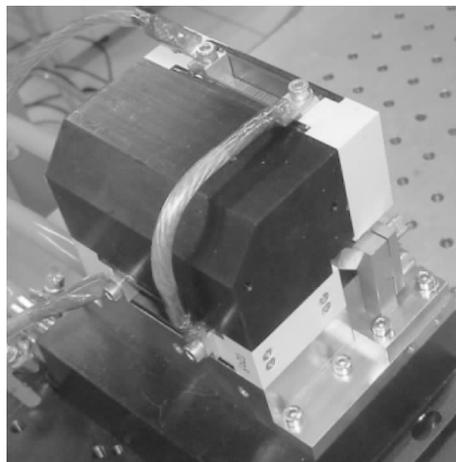


图8 Spatial coupling module

Fig.8 CW 50 W mini-bar 空间耦合叠阵

#### 4 基于偏振折叠的光纤耦合实验

偏振合束法是利用偏振耦合器将偏振方向的互相垂直的两束光合成,是提高 DL 光束亮度的一种方法。考虑 DL 光纤耦合中对慢轴方向光束质量的要求,设计一种光束整形法,将同一束光沿慢轴方向分为两部分,通过偏振合束法合成,将亮度、光束质量同时提高一倍,即偏振折叠光束整形法。如图 3 所示。

根据耦合设计,采用 CW 50 W mini-bar 空间耦合叠阵进行光纤耦合实验。得到偏振折叠前后的光斑照片如图 9 所示。偏振折叠整形后的光束经聚焦透镜会聚,在驱动电流为 1% DC、50 A 时由 CCD 采集到的焦点光斑强度分布如图 10 所示。图中白色圆圈的直径为 400  $\mu\text{m}$ 。

由于使用的光纤无法承受高功率,因此在加载 1% DC、50 A 的准连续电流时,进行了耦合效率测试。测得光纤前后脉冲激光功率分别为 258.5 W、186.9 W,耦合效率约为 72.3%,整体光光效率为 52.2%。

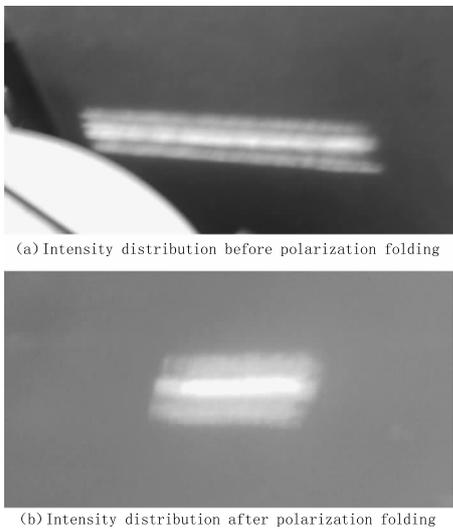


图9 偏振折叠前后的光斑图

Fig. 9 Beam profile of polarization folding



图10 焦点光强分布

Fig. 10 Intensity distribution before coupling

通过对系统不同部位光功率的监测,得到准

直透镜透过率 98.1%、空间耦合效率为 96.9%、慢轴扩束器传输效率为 92.0%、偏振折叠效率为 84.9%,聚焦透镜组传输效率为 97.4%。可以看出,除光学元件的传输损失外,影响整体耦合效率的主要因素为偏振折叠与光纤耦合造成的功率损失。偏振折叠部分的损失主要为芯片输出光束为偏振度 95% 的 p 光,以及半波片与平面反射镜造成的损失。耦合效率过低的原因则是偏振折叠中,光束经 3 块平面反射镜反射后造成的指向性偏差增大了光束的 BPP,并使焦点处光强分布不均匀,影响了光纤耦合效率。

下一步计划通过检测折叠后光束的远场强度分布来进行偏振折叠部分的调节工作,通过测量与计算掌握偏振折叠后光束的 BPP,以提高系统的耦合效率。另外,尝试对偏振折叠部分的结构进行改进,减少平面反射镜的使用以降低可能因平面反射镜装调误差造成的指向性偏差。

#### 5 结论

本文提出一种偏振折叠的光束整形方式,并采用一种 CW 50 W mini-bar 完成了相关耦合系统的设计。针对 mini-bar 的特殊结构与散热需求,设计了针对 mini-bar 封装用的特种微通道冷却器,并通过封装实验结果验证设计有效。将 10 片封装在铜微通道冷却器上的 CW 50 W mini-bar 组装成两列各 5 bar 的叠阵,实现了两列叠阵的激光束沿快轴方向的空间合成,合成后输出功率 439 W,空间耦合效率 97%。根据耦合系统的设计进行了 400  $\mu\text{m}$  芯径、0.22 NA 的光纤耦合实验,得到光纤输出端脉冲激光功率 186.9 W,整体光光效率为 52.2%。下一步工作将主要针对偏振折叠部分进行调整以提高耦合效率。

#### 参考文献:

- [1] Haag M, Köhler B, Biesenbach J, et al. Novel high brightness fiber coupled diode laser device [C] // Proc of SPIE. 2007; 64560T.
  - [2] Friedrich Bachmann, Peter loosen, Reinhart Poprawe. High power diode lasers: technology and applications [M]. Springer, 2007; 147 - 158.
  - [3] GUO Linhui, GAO Songxin, WU Deyong, et al. Beam collimation of diode laser vertical stack [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23 (3): 577 - 580. (in Chinese)
- 郭林辉,高松信,武德勇,等. 二极管激光器垂直阵列光束精密准直 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23 (3):

- 577 - 580.
- [4] GAO Songxin, WU Deyong, WANG Jun, et al. Multiplayer bonding technique for high power diode laser package [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(5): 447 - 449. (in Chinese)  
高松信, 武德勇, 王骏, 等. 高功率二极管激光器封装的多层焊接技术[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(5): 447 - 449.
- [5] GAO Xin, BO Baoxue, QIAO Zhongliang, et al. Single fiber coupling of multi-linear-array-diode-lasers [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(7): 1229 - 1234. (in Chinese)  
高欣, 薄报学, 乔忠良, 等. 多线阵半导体激光器的单光纤耦合输出[J]. 光子学报, 2010, 39(7): 1229 - 1234.
- [6] WANG Zuolan, Segref A, Koenning T, et al. Fiber coupled diode laser beam parameter product calculation and rules for optimized design [C]//Proc of SPIE, 2011: 791809.
- [7] Wolf P, Köhler B, Rotter K, et al. High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device [C]//Proc of SPIE, 2011: 791800.
- [8] Koenning T, Alegria K, Wang Zuolan, et al. Macro-channel cooled, high power, fiber coupled diode lasers exceeding 1.2kW of output power [C]//Proc of SPIE. 2011: 79180E.
- [9] Pittroff W, Erbert G, Eppich B, et al. Conductively cooled 1 kW-QCW diode laser stacks enabling simple fiber coupling [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2010, 33(1): 206 - 214.
- [10] GUO Linhui, TANG Chun, WU Deyong, et al. Measurement of "smile" for high-power diode laser array [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 196 - 197. (in Chinese)  
郭林辉, 唐淳, 武德勇, 等. 大功率二极管激光阵列的"smile"测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 196 - 197.