

基于光子灯笼的 976 nm 半导体激光相干合束

董一甲^{1,2}, 刘杰¹, 赵欣瑞^{1,2}, 林星辰¹, 宁永强¹, 王立军¹, 朱洪波^{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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 采用具有模式转换和无损传输特性的三模非模式选择光子灯笼(PL)实现了 976 nm 波长的半导体激光的相干合束。相对于半导体激光常规空间孔径相干合束的方式,所提合束光场不会产生旁瓣,且能拥有较高的光束质量。通过仿真 PL 合束特性,搭建合束实验系统,最终 976 nm 波长的半导体激光基模输出功率达 99.7 mW,转换效率为 33.2%。实验结果表明,此合束系统实现了模式转换,使半导体激光能够以基模输出,展现了一种有潜力的半导体激光相干合束的方法。

关键词 半导体激光; 光子灯笼; 相干合束; 相位调控; 光纤模式

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231227

Coherent Beam Combining of 976 nm Diode Laser Based on Photonic Lantern

Dong Yijia^{1,2}, Liu Jie¹, Zhao Xinrui^{1,2}, Lin Xingchen¹, Ning Yongqiang¹, Wang Lijun¹, Zhu Hongbo^{1*}¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A three-mode non-mode selective photonic lantern (PL) with mode conversion and lossless transmission characteristic is used to achieve coherent beam combining of a diode laser at 976 nm. Compared with the conventional spatial aperture coherent beam combining of diode lasers, the proposed beam combining field does not produce side flaps and has high beam quality. By simulating the beam combining characteristics of the PL and building a complete beam combining experimental system, final 976 nm diode laser fundamental mode output power reached 99.7 mW with a conversion efficiency of 33.2%. The experimental results show that this beam combining system achieves mode conversion and enables the diode laser to output in fundamental mode, demonstrating a promising method for coherent beam combining of diode lasers.

Key words diode laser; photonic lantern; coherent beam combining; phase modulation; fiber mode

1 引言

半导体激光相干合束技术是同时提升半导体激光器输出功率和光束质量的重要途径^[1-2]。相干合束对光的振幅、相位、偏振等进行精确调控,具备系统扩展性强、合成效率高的优点,不但能够提升合束光相干性,还可进一步提高激光输出功率和光束质量。目前,半导体激光器多采用透镜阵列使多路激光在远场相干叠加^[3-4],从而实现高功率和强相干性输出。然而,这

种情况下合成的光斑往往伴随着旁瓣的产生,会影响远场光斑的亮度,无法实现高光束质量输出。因此,如何避免半导体激光相干合束产生旁瓣,使半导体激光实现基模输出,是一个至关重要的问题。

光子灯笼(PL)是一种线性光学器件,由于其绝热拉锥特性能够实现单模波导与多模波导之间的低损耗转换,因此在模分复用^[5-9]、激光模式稳定^[10-12]等诸多领域有广泛应用。2016年,Wittek等^[13]利用 3×1 PL在大模面积掺铒光纤中展示了选择性空间模式的放大,

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-05-06; 录用日期: 2023-05-08; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(62222410)、吉林省科技发展计划(20210201019GX, 20220201090GX)

通信作者: *zhbcimp@163.com

并获得了三个线性偏振(LP)模式的输出,最高功率达 2 W。2017年, Montoya 等^[14]利用 PL 前端的多模光纤放大器及泵浦增益光纤实现二级放大,最终得到 kW 级输出,有效抑制了横模振荡。2021~2022年,国防科技大学的陆瑶等^[11,15]通过分段拼接等手段,在 50 μm 的纤芯中实现了 1064 nm 波长的光纤激光基模输出。目前 PL 合束的应用集中在光纤激光器上,合束波长主要为通信波段的 1064 nm 和 1550 nm^[16-17],而半导体激光器具有光纤激光器所不具备的电光效率高和波长范围宽等多个优点^[18]。因此,本文在仿真对比了三模模式选择 PL (MSPL) 和非模式选择 PL (NMSPL) 的传输特性之后,采用合束效率更高的三模 NMSPL 对 976 nm 波长半导体激光进行相干合束。将 976 nm 波长半导体激光作为激光源并分成三路光束,每路连接相位调制器,搭建了算法控制系统,以光电探测器和电荷耦合器件 (CCD) 相机为反馈观测模块,最终实现了 976 nm 波长半导体激光 LP₀₁ 基模输出,输出功率达 99.7 mW,转换效率为 33.2%。实验结果表明,此合束系统提高了合成光束的光束质量,实现了半导体激光的基模输出,即验证了 976 nm 波长的半导体激光器基于 PL 进行相干合束的可行性。这也意味着目前使用光纤耦合输出的半导体激光器可以通过光纤结构的 PL 进行相干合束,是半导体激光相干合束的一种可行的方法。

2 PL 相干合束基本原理

2.1 PL 模式传输和控制理论

PL 基本结构如图 1 所示,左端为紧密排列的单模光纤阵列,中间为过渡区,右端为多模或少模光纤^[19]。过渡区是单模光纤放入低折射率的玻璃套管里进行熔融拉锥所形成的。拉锥过程中,单模端光纤纤芯直径逐渐减小,包层不断融合逐渐变成多模光纤纤芯,同时包裹光纤的玻璃套管逐渐变成了多模光纤的包层。通过绝热锥度转换的方式,PL 单模光纤中的模式可以无损地转换为多模光纤的模式,此过程可逆。只要单模光纤的数量等于(或大于)多模光纤所支持的模式数量,这种转换就是有效的。由热力学第二定律可知,除非单模系统和多模系统的自由度是一致的(单模光纤

数量和多模光纤中模式数量一致),否则系统不可能保持熵平衡,光也不可能以无损的方式在两个系统中来回耦合^[20]。PL 的绝热特性和模式转换特性使得模式在其中的传输是低损耗的,因此基于 PL 的相干合束拥有比传统合束方式更丰富的应用前景^[10]。

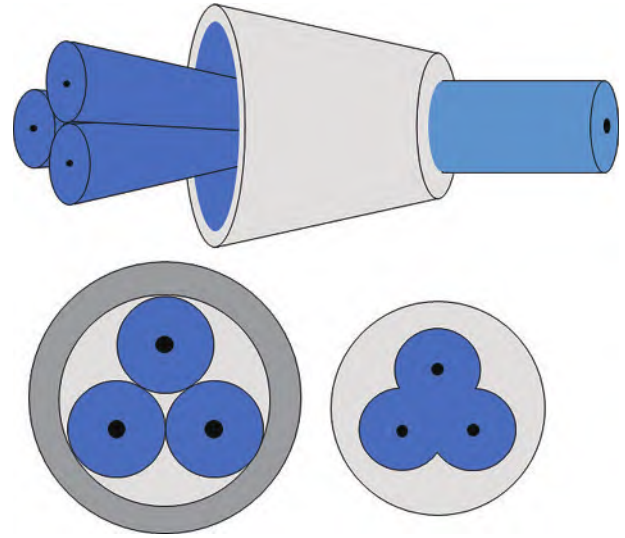


图 1 PL 结构及截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure and cross section of the PL

根据功能的不同 PL 分为 MSPL 和 NMSPL 两种类型。MSPL 在不同单模端口激发不同的模式,适用于模分复用和解复用;而 NMSPL 则是实现合束的最优选。以三模 NMSPL 为例,当 LP₀₁ 基模从三模 NMSPL 的少模端输入,如果不考虑光纤中的模式耦合,所有的输入功率都被分配到振幅 ν 和相位 θ 不同的单模光纤中。由于光路可逆,必须在 PL 的单模光纤输入相同振幅 ν 和相位 θ 的光束才能在少模光纤中实现纯基模输出。同样,为了获得其他高阶模式的独立输出,也需要获得该高阶模式反向输入时每个单模光纤的对应功率和相位。因此, NMSPL 的模式控制功能可以通过控制每个输入光纤的振幅 ν 和相位 θ 来实现。传输矩阵可以描述 PL 中输入和输出之间的关系。

NMSPL 的单模端光纤直径相同,因此结构对称,满足公式:

$$\begin{cases} \xi^{(0)} = \sum_{j=1}^n \bar{\xi}_j & L=0, \quad n \text{ is odd} \\ \xi^{(\pm L)} = \sum_{j=1}^n \exp(\pm i2\pi Lj/n) \bar{\xi}_j & 1 \leq L < n/2, \quad n \text{ is odd} \\ \xi^{(n/2)} = \sum_{j=1}^n (-1)^j \bar{\xi}_j & n \text{ is even} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\xi^{(\pm L)}$ 对应 PL 环形超模场,环上的每一个纤芯内的场分布与前一个纤芯内场分布的相位相差 $\pm 2\pi L/n$, L 取整数,代表序数; $\bar{\xi}_j$ 为第 j 根光纤内的光场分布; n 为纤芯数。

根据理想 PL 中模式的输入和输出叠加之间的关

系,可以得到三模 NMSPL 的传输矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \\ 2/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} \\ 0 & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据式(2),便可得到不同模式单独输出时所对应的相位、振幅输入情况,从而实现 NMSPL 的模式控制^[21]。

2.2 三模 PL 中的模式演化

为仔细了解三模 PL 中的模式转换情况,利用 RSoft 软件分别优化仿真了三模 MSPL 和 NMSPL,并基于光束传播法进行近似求解,获得相应的模场分布。PL 的锥区长度设置为 40000 μm ,单模端和少模端光纤设计基于标准光纤参数要求:单模光纤纤芯折射率 1.4682、包层折射率 1.4629、包层直径 125 μm ;少模光

纤包层直径 125 μm 、纤芯直径 14 μm 。

用三根纤芯直径分别为 9, 8, 7 μm 的单模光纤拉锥得到的即为 MSPL,如图 2(a)所示,分别在每根光纤中输入 LP_{01} 模式。纤芯 1 经锥区传输得到 LP_{11a} 模式输出,纤芯 2 传输得到 LP_{11b} 模式输出,如图 2(b)、(c)所示。纤芯 3 传输得到 LP_{01} 模式输出,如图 2(d)所示,输入强度为 1 的情况下输出强度为 0.812。同时激励纤芯 1 和 2,并使输入光保持 $\pi/2$ 的相位差,选取适当锥区长度,激励出环形轨道角动量(OAM)模式,如图 2(e)所示。

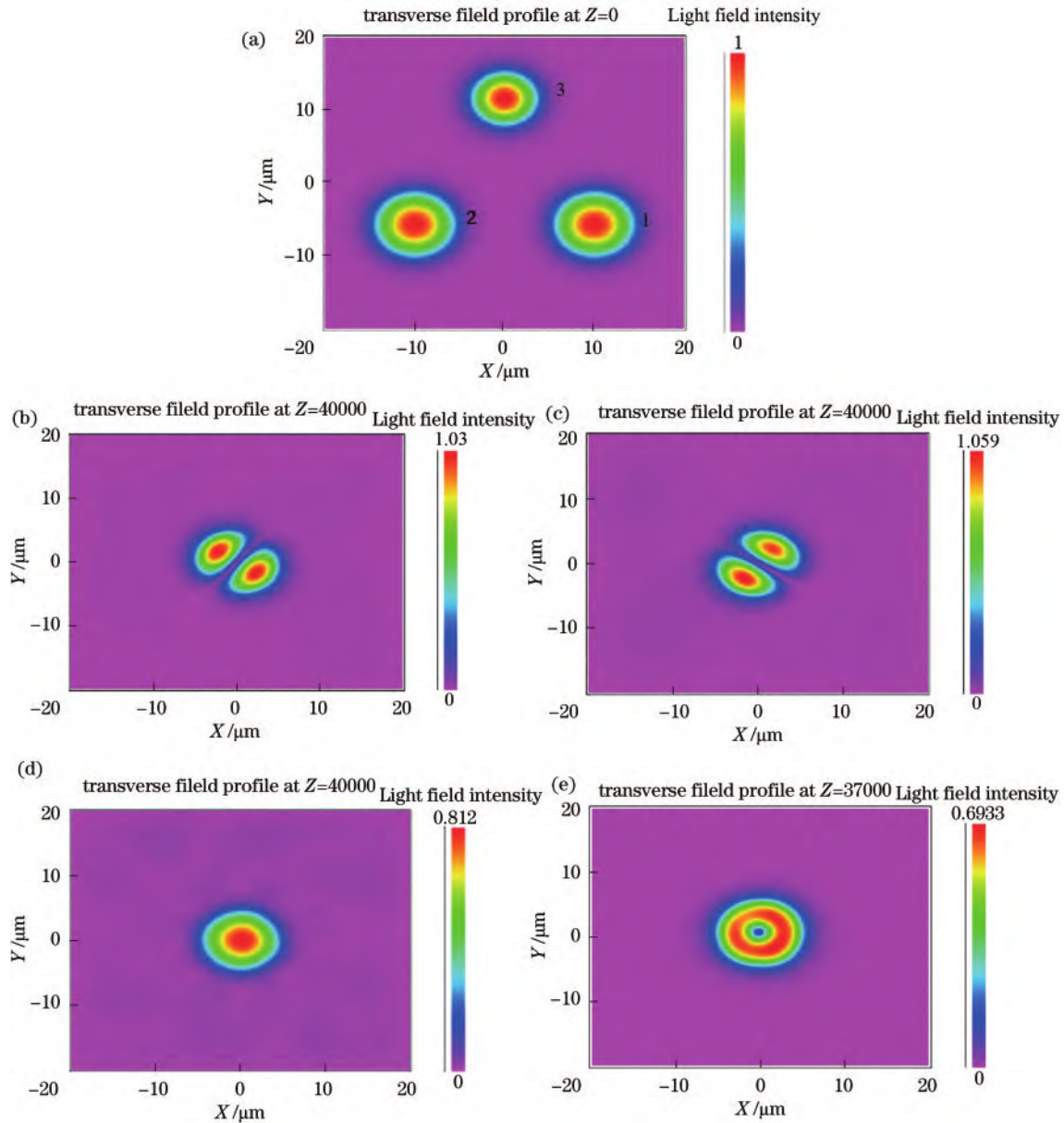


图 2 MSPL 的模式传输特性。(a)单模光纤截面示意图;(b)~(e) LP_{11a} 、 LP_{11b} 、 LP_{01} 、 OAM_{01} 模式
Fig. 2 Mode transmission characteristics of the MSPL. (a) Schematic of single-mode fiber cross section;
(b)~(e) LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{01} , OAM_{01} mode

NMSPL 采用的是三根直径完全相同的光纤,直径取值与实验中使用的光纤直径相吻合,均为 8.2 μm 。此时的入射纤芯不存在任何区别,在每根单模光纤端

口激发基模不会得到与 MSPL 一样对应的模式。当每根单模光纤的输入为 LP_{01} 模时,由于相位因素的随机性,输出模式在少模端表现为随机性,在多个模式

之间直接来回转换,如图 3 所示。此时输出光束是基模和高阶模式的叠加,模式之间相互耦合,光束质量

较低。因此,想要提高合束质量,就需要对 NMSPL 进行模式控制。

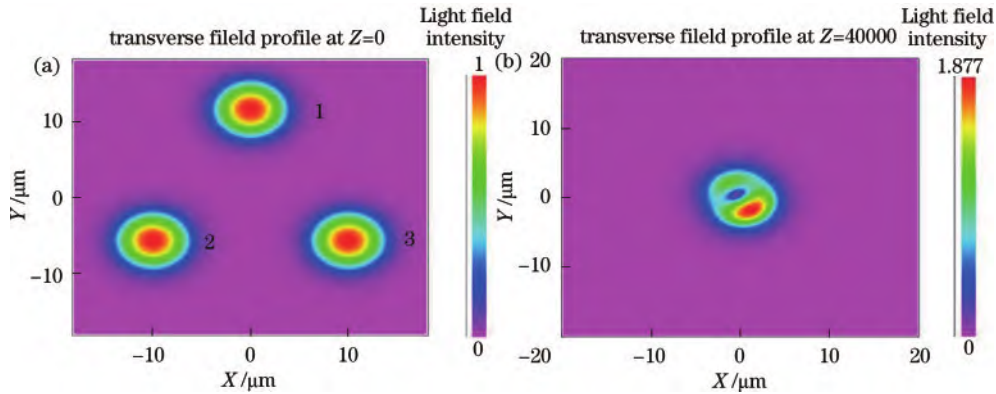


图 3 NMSPL 的模式传输特性。(a)单模光纤截面示意图;(b)输出模式(不唯一)

Fig. 3 Mode transmission characteristics of the NMSPL. (a) Schematic of single-mode fiber cross section; (b) output mode (not unique)

根据前面计算得到的传输矩阵可以得到明确的振幅和相位。表 1 展示了仿真得到 LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 模式时分别对应的输入振幅(功率) I 及相位分布。为了研究与表 1 相对应的不同输入振幅和相位在锥区产生的模式变化,以锥区变细方向为 Z 轴方向,每隔 $5000 \mu\text{m}$ 分析锥区截面的光场变化,将其绘制在图 4 中。在三路输入光不存在相位差的情况下,得到了基模输出。

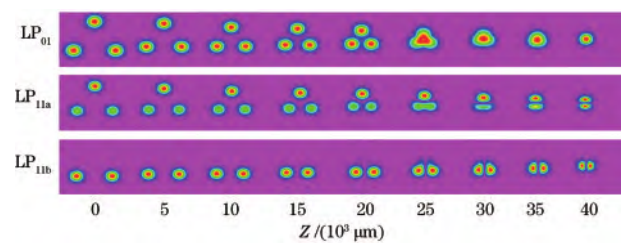


图 4 三模 NMSPL 实现模式控制仿真示意图

Fig. 4 Mode control simulation of three-mode NMSPL implementation

表 1 NMSPL 三路光纤输入情况

Table 1 Three-way fiber inputs of NMSPL

Input (amplitude, phase)	Core 1	Core 2	Core 3
I_1	(1,0)	(1,0)	(1,0)
I_2	(1,0)	(0.5, π)	(0.5, π)
I_3	(1,0)	(1, π)	(0,0)

最终得到 LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 的输出强度分别为 1.820、1.463、1.464。从仿真结果可以看出,无论是 MSPL 还是 NMSPL,都可以得到基模。但是, NMSPL 所能得到的激光强度是 MSPL 的 2.2 倍。即由于 NMSPL 的单模端光纤利用率更高,因此能获得

更高的能量输出,更适合进行合束。

3 基于 PL 的半导体激光相干合束系统

设计搭建的基于 PL 的半导体激光相干合束系统如图 5 所示。实验采用 976 nm 波长单频半导体激光器作为激光源,它具有超窄线宽($<1 \text{ MHz}$)。激光源经过分束后分成三路,每路功率相同,可在 $0 \sim 100 \text{ mW}$ 范围内调节。相位调制器(PM)为 iXblue 公司的铌酸锂相位调制器(型号为 NIR-MPX-LN-0.2),具体参数如表 2 所示,其中, V_π 为半波电压,表示相位改变 π 时电压的变化量。

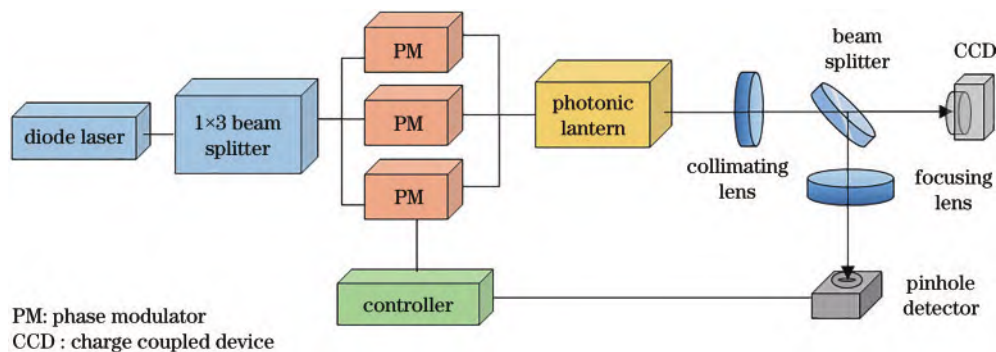


图 5 基于 PL 的半导体激光相干合束系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of coherent diode laser beam combining system based on PL

表 2 PM 工作参数

Table 2 Operating parameters of PM

Parameter	Numerical value
Operating wavelength	950–1150 nm
Electro-optical bandwidth	2 GHz
V_{π} RF (radio frequency) @50 kHz	1.5 V

PM 是此调控系统的核心组成部分。实验均采用保偏光纤, 以确保传输过程中光的偏振状态不发生改变。PL 出射光经过准直透镜后由分束镜分成两路, 其中一路直接耦合进 CCD 相机, 以观测近场光斑模式。选取焦距为 2.25 cm 的凸透镜作为准直透镜, 并放在六轴调整架上对其进行精细调整。分束镜为平面镜, 在其表面镀上 976 nm 的反射膜, 其中功率透射反射之比为 9:1。反射一路经焦距为 30 cm 的聚焦镜收束, 并通过孔径为 50 μm 的针孔耦合进光电探测器。针孔固定在探测器前端, 探测器放置于聚焦镜的后焦面。以 LP_{01} 模式光功率作为系统性能评估函数, LP_{01} 模式在角向具有光强分布, 而 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式在此角向具有光强零点。基于此模式特点, 在光电探测器之前放置针孔来对输出光束的角向分量进行采样, 以便区分出 LP_{01} 和 LP_{11} 模式。远场光经过光电探测器转换成电信号, 接着随机并行梯度下降 (SPGD) 控制算法产生一系列随机干扰电压, 并将其信号输送至每个 PM 上, 再根据反馈的电信号确定由随机干扰电压引起的系统功率评价函数的变化, 然后更新每路光束的相位控制电压, 并重新应用到 PM 上。此过程中, 通过控制程序设定扰动电压的幅值 Δu 和迭代系数 m , 不断进行调试, 并实时监控 CCD 相机探测到的图像, 以此迭代进行, 直至算法收敛, 从而实现半导体激光合束光斑的模式控制。

4 实验结果与分析

4.1 系统损耗测量

实验系统中, 光电器件自身的损耗、采用法兰接头产生的连接损耗等, 均会影响合束效率, 需要对整个装置进行损耗测量以掌握整个系统的性能。损耗计算公式为

$$I_L = 10 \lg(P_{in}/P_{out}) \quad (3)$$

式中: I_L 为损耗计算值, 单位为 dB; P_{in} 为 976 nm 波长半导体激光器入射至 PL 单模端的总输入功率; P_{out} 为经 PL 合束后的输出光束功率。从每路光束输入功率为 5 mW 开始进行多次功率测试, 依次增加 5 mW 直至增加到 100 mW, 测量结果如图 6 所示。损耗最高值为 4.78 dB, 整个系统的损耗随着输入功率的增加而提高。在每路单模光纤输入 100 mW 的情况下, 最高输出功率达到 99.7 mW, 对应输出为 LP_{01} 模。除去连接

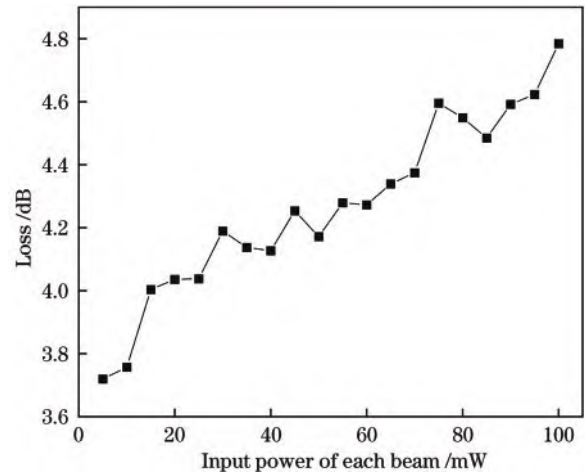


图 6 系统能量损耗与输入功率关系

Fig. 6 System loss versus input power

损耗, PM 和 PL 两部分的损耗占主要部分, 其中 PM 损耗在 3 dB 左右。PL 特有的也是公认的损耗原因是模式数量的减少以及对称性和非绝热过渡导致的模序变化。理论上讲, 当 PL 的锥区在无限平稳过渡的情况下, PL 中的模式才是无损传输的。实际上, PL 融化并逐渐变细的过程受到操作的限制, 这就导致了在传输过程中, 部分模式能量在过细的纤芯处无法被引导, 从而泄漏到外包层造成能量的损失。此外, 单模光纤插入低折射率套管拉锥的过程不能保证单模光纤为理想对称性分布, 间距更小的光纤之间更容易产生不必要的模式间耦合, 导致额外的损耗。

4.2 相位控制结果

在系统未开启控制算法, 即开环状态时, PM 无任何施加电压, 合束光斑呈现无规则的变化, 在不同模式之间来回转换, 图 7(a) 为 CCD 摄取的近场光斑图案。在实际的激光合束实验中还观测到, 当对光纤有一个轻微的扰动或者环境中空气产生轻微的波动, 合束光将会产生迅速且剧烈的变化, 此时的光斑状态十分不稳定, 能量分布也是分散的。而通过不断地改变 SPGD 算法的扰动电压 (扰动电压幅值在 10~200 mV 之间调整) 和迭代系数, 选取 LP_{01} 模作为评价函数, 经过不断地测试, 实现了闭环状态下 LP_{01} 模的输出, 如图 7(b) 所示。同样, 选取 LP_{11a} 、 LP_{11b} 模式为评价函数得到的近场光斑如图 7(c)、(d) 所示, 此时的光斑图案较理想 LP_{11} 模式有一定的缺陷, 这可能是因为 PL 拉制过程中光纤融合不均匀, 各路光在传输过程中不能很好地耦合。在输出 LP_{01} 模时测得的输出功率最高, 与上述仿真结果吻合。将开环和闭环时输出光束的光斑进行对比发现, 在对合束系统进行模式控制之后, 光斑能够呈现出单一模式形态。其中 LP_{01} 模式表明整个传输系统实现了稳定的输出, 能够呈现出基模状态, 此时输出光束的光束质量最高。

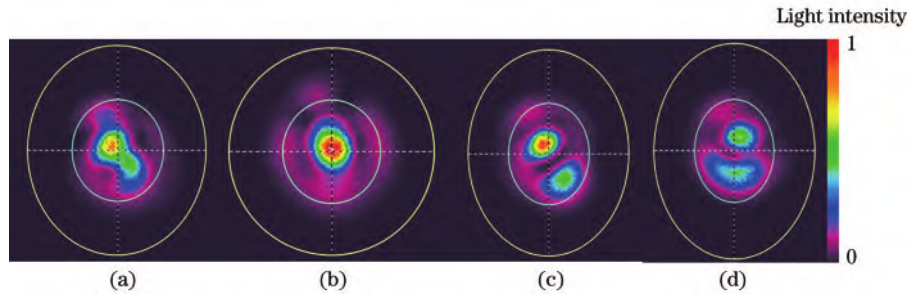


图7 实际观测模式的CCD近场光斑图像。(a)开环状态下CCD近场光斑图像;(b)~(d)闭环状态下 LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 模CCD近场光斑图像

Fig. 7 CCD near-field spot images of actual observed modes. (a) CCD near-field spot image in open-loop condition; (b)–(d) CCD near-field spot images of LP_{01} , LP_{11a} and LP_{11b} in closed-loop condition

5 结 论

首先对基于PL的半导体激光相干合束系统进行了仿真和实验分析。仿真结果表明,NMSPL所能得到的激光强度是MSPL的2.2倍,极大地提高了PL输入端单模光纤的利用率。然后,搭建了基于PL的半导体激光相干合束系统,得到的最大输出功率为99.7 mW。同时进行了相位控制实验,结果表明:当不施加相位控制时,合束光斑呈现无规则的变化;施加相位控制之后,能够得到单一模式形态,获得了稳定的976 nm波长半导体激光的单模输出,高阶模式含量低,且无旁瓣产生。也就是说,采用光纤耦合方式输出的半导体激光器,通过PL进行相干合成是可行的,这对实现更多波长的半导体激光基模输出有重要意义,同时为消除半导体激光传统空间传输相干合束产生的旁瓣提供了可能的技术解决方案。进一步的研究将致力于将此模式控制系统与半导体光放大器相结合,期待实现更高的功率输出。此外,对拥有更多单模光纤输入端口的PL,此研究可能会扩展到更多的模式区域。

参 考 文 献

- [1] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 567-577.
- [2] 周朴, 栗荣涛, 马闯星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011—2020[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401003. Zhou P, Su R T, Ma Y X, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401003.
- [3] Schimmel G, Doyen I, Janicot S, et al. Passive coherent combining of two tapered laser diodes in an interferometric external cavity[C]//2015 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD), October 14-15, 2015, Coventry, UK. New York: IEEE Press, 2016: 11-12.
- [4] Albrodt P, Niemeyer M, Elattar M, et al. Low-index quantum-barrier single-pass tapered semiconductor optical amplifiers for efficient coherent beam combining[J]. Semiconductor Science and Technology, 2020, 35(6): 065018.
- [5] Leon-Saval S G, Fontaine N K, Salazar-Gil J R, et al. Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 1036-1044.
- [6] Eznaveh Z S, Antonio-Lopez J E, Zacarias J C A, et al. All-fiber few-mode multicore photonic lantern mode multiplexer[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16701-16707.
- [7] 陈嘉轲, 胡贵军, 韩悦羽. 基于光子灯笼的 3×3 模分复用通信实验系统[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106009. Chen J K, Hu G J, Han Y Y. Communication experimental system with 3×3 mode division multiplexing based on photonic lantern[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106009.
- [8] Eznaveh Z S, Zacarias J C A, Lopez J E A, et al. Photonic lantern broadband orbital angular momentum mode multiplexer[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30042-30051.
- [9] 张强, 郭玉彬, 陈嘉轲, 等. 基于相位调制-相干检测的模分复用通信实验[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0306001. Zhang Q, Guo Y B, Chen J K, et al. A communication experiment using mode division multiplexing with phase modulation-coherent detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0306001.
- [10] 杨欢, 陈子伦, 刘文广, 等. 光子灯笼研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120002. Yang H, Chen Z L, Liu W G, et al. Recent progress in photonic lantern[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120002.
- [11] Lu Y, Chen Z L, Liu W G, et al. Stable single transverse mode excitation in 50 μm core fiber using a photonic-lantern-based adaptive control system[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22435-22441.
- [12] Montoya J, Aleshire C, Hwang C, et al. Photonic lantern adaptive spatial mode control in LMA fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3405-3413.
- [13] Wittek S, Ramirez R B, Zacarias J A, et al. Mode-selective amplification in a large mode area Yb-doped fiber using a photonic lantern[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2157-2160.
- [14] Montoya J, Hwang C, Martz D, et al. Photonic lantern kW-class fiber amplifier[J]. Optics Express, 2017, 25

- (22): 27543-27550.
- [15] 陆瑶, 姜宗福, 刘文广, 等. 3×1 光子灯笼实现 $30 \mu\text{m}$ 纤芯光纤激光模式控制[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1736001.
Lu Y, Jiang Z F, Liu W G, et al. Laser mode control in fiber with core diameter of $30 \mu\text{m}$ based on 3×1 photonic lantern[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1736001.
- [16] Wang N, Alvarado-Zacarias J C, Habib M S, et al. Mode-selective few-mode Brillouin fiber lasers based on intramodal and intermodal SBS[J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2323-2326.
- [17] Lu Y, Liu W G, Chen Z L, et al. Spatial mode control based on photonic lanterns[J]. Optics Express, 2021, 29(25): 41788-41797.
- [18] 王立军, 彭航宇, 张俊, 等. 高功率高亮度半导体激光器合束进展[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0401001.
Wang L J, Peng H Y, Zhang J, et al. Development of beam combining of high power high brightness diode lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 0401001.
- [19] Norris B R M, Wei J, Betters C H, et al. An all-photonic focal-plane wavefront sensor[J]. Nature Communications, 2020, 11: 5335.
- [20] Birks T A, Gris-Sánchez I, Yerolatsitis S, et al. The photonic lantern[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(2): 107-167.
- [21] 冯泽亮. 基于光子灯笼的相干合束技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
Feng Z L. Research on coherent beam combining technology based on photonic lantern[D]. Changchun: Jilin University, 2022.