

# 980 nm 双包层光子晶体光纤激光器

李平雪, 张雪霞, 刘志

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要:**采用内包层直径为 200  $\mu\text{m}$ 、纤芯直径 40  $\mu\text{m}$ 、长度 45 cm 的掺镱双包层光子晶体光纤作为增益介质, 915 nm 激光二极管(LD)泵浦源, 实现了运转于准三能级系统的 980 nm 连续激光输出。双端输出时, 总输出功率为 463.3 mW, 斜效率为 17.8%; 单端输出时, 输出功率为 543 mW, 斜效率为 11.6%。

**关键词:**光子晶体光纤; 准三能级; 980 nm 激光器

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

## 980 nm double-clad photonic crystal fiber laser

LI Ping-xue, ZHANG Xue-xia, LIU Zhi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** A quasi-three-level Yb-doped double-clad photonic crystal fiber laser at 980 nm pumped by 915 nm LD laser is reported. The photonic crystal fiber used in the experiment has a core diameter of 40  $\mu\text{m}$ , inner clad of 200  $\mu\text{m}$ , an absorption coefficient of about 9 dB/m at 980 nm. The fiber length is 45 cm. The 980 nm photonic crystal fiber laser of the double-ended output mode emitted 463.3 mW with a slope efficiency of 17.8%. In the single-end output experiment, an output power of 543 mW with a slope efficiency of 11.6% has been achieved.

**Key words:** photonic crystal fiber; quasi-three-level; 980 nm laser

### 1 引言

光纤激光器由于其效率高、光束质量好、体积小、无水冷、可实现全纤化等优点, 在光通信、光传感、激光加工等领域都获得了广泛的应用。在光纤激光器中, 掺镱光纤激光器发展最为迅速。与其他掺杂光纤激光器相比, 它不存在激发态吸收(ESA)和浓度淬灭效应, 具有量子转换效率高的优点<sup>[1]</sup>。从镱粒子的吸收发射光谱图中可以知道<sup>[2]</sup>, 掺镱光纤激光器运转于三能级系统时, 输出波长为 980 nm。与 980 nm 半导体激光器相比, 980 nm 光纤激光器可以同时具有输出功率高、光束质量好和容易实现功率合成的优点。最初人们多采用普通的高掺杂单模掺镱光纤作为增益介质实现 980 nm 激光输出<sup>[3-4]</sup>。但由于普通单模掺镱光纤小的纤芯尺寸限制, 泵浦源只能采用输出功率为百毫瓦量级的 915 nm 或 940 nm 单模半导体激光器, 限制了激光器输出功率

的提高。光子晶体光纤的出现解决了这一问题。这是因为光子晶体光纤利用其灵活多变的结构能够实现大纤芯面积的单模输出; 容易实现内包层大的数值孔径, 从而提高对泵浦光的吸收效率; 同时还可以实现纤芯和内包层直径大的比值, 从而降低激光的振荡阈值, 保证 980 nm 激光高效运转。而普通的大模场双包层光纤很难同时实现以上几点。980 nm 掺镱光纤激光器的研究国内外已有相关报道: 2003 年英国南安普斯顿大学用数值孔径大于 0.7 的光子晶体光纤作增益介质, 获得 1.4 W 单模 977 nm 激光输出<sup>[5]</sup>。同年, 他们又报道了用自行设计的数值孔径为 0.5, 内包层直径 28  $\mu\text{m}$ , 纤芯直径 10  $\mu\text{m}$  的

**作者简介:** 李平雪(1974-), 女, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事全固态可调谐激光器, 光纤激光器及其频率变换技术研究。  
E-mail: pxli@bjut.edu.cn

**收稿日期:** 2010-09-06; **修订日期:** 2010-11-18

光子晶体光纤,获得 3.5 W 近衍射极限 977 nm 的激光,斜效率达到 42%<sup>[6]</sup>。2008 年,德国耶拿大学采用 915 nm LD 泵浦纤芯直径 80  $\mu\text{m}$ ,内包层直径 200  $\mu\text{m}$  的棒状光子晶体光纤,获得 94 W 的 980 nm 激光输出<sup>[7-8]</sup>。2007 年开始,本实验室开展了 980 nm 普通单模掺镱光纤激光器和放大器的理论和实验研究,利用自制 946 nm 激光器泵浦普通的单模掺镱光纤,获得 1.32 W 的 980 nm 单模激光输出<sup>[9]</sup>。

采用棒状光子晶体光纤存在一个缺陷:光纤不能弯曲,很容易折断;而普通的单模掺镱光纤由于本身的结构限制了泵浦光的耦合效率,从而限制了 980 nm 激光的高功率输出。为此,我们尝试在普通柔性的大模场双包层光子晶体光纤中实现 980 nm 激光输出。本文根据已有的掺镱光纤中 980 nm 与 1030 nm 的增益关系分析<sup>[10]</sup>,采用包层直径为 200  $\mu\text{m}$ ,纤芯直径为 40  $\mu\text{m}$ ,光纤长度为 45 cm 的谐振腔结构光子晶体光纤,合理设计光子晶体光纤的最佳长度,使用光纤耦合输出的、波长为 915 nm 的二极管(LD)泵浦掺镱光子晶体光纤,在以两个 0°角的光纤端面作为腔镜的双端输出方式下,获得 463.3 mW 的 980 nm 连续单模激光输出,斜效率为 17.8%;在采用 0°角光纤端面和高反镜作为腔镜的单端输出方式中,980 nm 激光的输出功率达到 543 mW,斜效率为 11.6%。实验中测得光谱带宽为 6 nm,中心波长为 980 nm。

## 2 实验研究

### 2.1 双端输出方式

实验装置如图 1 所示,采用光纤两端面构成的激光谐振腔结构和双端输出的方式,915 nm 的 LD 泵浦光直接由光纤耦合输出,尾纤芯径为 200  $\mu\text{m}$ ,通过两平凸透镜组成的 1:1 耦合系统将 915 nm 泵浦光耦合进光子晶体光纤中,实验测得泵浦光耦合效率为 81.1%。在两个平凸透镜中间加一个镀有 915 nm,1030 nm 高透和 980 nm 高反多色镜以导出泵浦端的 980 nm 激光。光子晶体光纤两端面均研磨成 0°角,两个 0°角端面(菲涅尔反射率约 4%)作为激光器的两个腔镜,980 nm 激光从光纤两端面直接输出。M2 为镀有 980 nm 高透膜,915 nm 高反膜以及 1030 ~ 1100 nm 高反膜的多色镜,在本实验中作为 980 nm 激光输出的滤波片。实验中所用的光子晶体光纤两端面的放电处理和研磨程序都是由本实验室自行完成的。处理后的端面在 400 倍的放大

镜下观察没有任何划痕,能够很清晰的看到两个应力源,当放大镜调到合适的位置时,端面的内包层结构边缘的微孔也能清晰的观察到。研磨后的光纤端面的光洁度能够完全满足实验的要求。直接切断后的光子晶体光纤端面图和处理完后的光子晶体光纤的端面图如图 2(a)和图 2(b)所示。

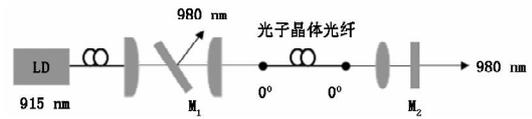
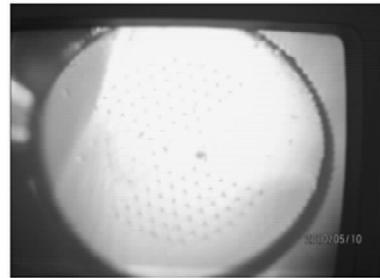


图 1 980 nm 光子晶体光纤激光器实验装置图

Fig. 1 experimental setup of 980 nm photonic crystal fiber laser



(a) 直接切断后的光纤端面图

(a) the fiber end before grinding



(b) 研磨后的光纤端面图

(b) the fiber end after grinding

图 2 光纤端面图

Fig. 2 the fiber end

实验中光子晶体光纤的纤芯直径为 40  $\mu\text{m}$ ,内包层直径为 200  $\mu\text{m}$ ,对 980 nm 的吸收系数是 9 dB/m,对 915 nm 的吸收系数大约 3 dB/m。实验中通过光谱仪观察 980 nm 激光光谱的变化情况。从光谱图中可知,当泵浦电流为 36 A 时,开始产生 980 nm 激光振荡;当泵浦电流小于 36 A 时,不能产生激光振荡,输出光为放大的自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)。当泵浦电流为 35 A 时,在 980 nm 附近产生的 ASE 分别如图 3 所示。ASE 在光谱图中显示比较光滑的曲线,线宽比较宽,在泵浦电流增加到 35 A 的过程中,光谱曲线的形状变化不明显。由于 980 nm 波段的激光属于准三能级系统,同时此波段也是镱离子的吸收峰值,所以光纤对 980 nm 激

光存在严重的重吸收效应,激光阈值较高。在实验中为了减小光纤对 980 nm 激光的重吸收效应,获得 980 nm 激光的高效输出,通常选择高掺杂、短长度的光纤,所以在实验中我们选择了长度仅为 45 cm 的光子晶体光纤。当泵浦电流达到 36 A 时,光谱线宽变窄,开始有激光产生,但在输出光中还含有 ASE (如图 4 所示),此时对应的 915 nm 泵浦光的功率为 16.2 W。随着泵浦电流的增大,光谱线宽变得很窄。这主要是因为产生 980 nm 激光振荡后,随着泵浦功率的增加,980 nm 输出激光迅速增加,其强度相对于 ASE 来说强很多倍,所以在光谱图中呈现出 980 nm 激光线宽变窄,ASE 相对下降的趋势。当泵浦电流达到最大值 45 A 时,相应泵浦功率为 18.8 W 时,获得两端总输出为 463.3 mW 的 980 nm 单模连续激光输出。在实验过程中我们发现,在电流增加的过程中,运转于四能级的 1030 nm 波段一直没有激光产生,只是产生比较小的 ASE,与 980 nm 激光相比强度很弱。在泵浦电流为 45 A 时,980 nm 激光与 1030 nm ASE 的相对强度为 23 dB。实验中测得的 980 nm 单模激光输出功率与泵浦电流的关系如图 5 所示,泵浦光的阈值功率为 13.1 W,光纤激光器的斜效率为 17.8%。

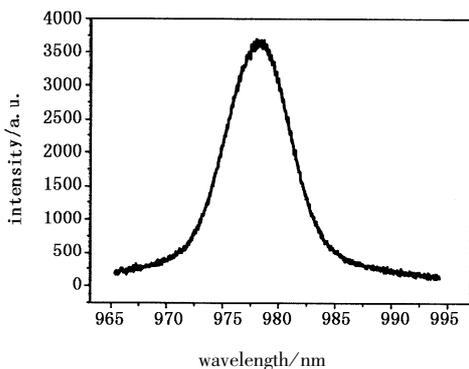


图 3 泵浦电流 35 A 时 980 nm 的 ASE 光谱  
Fig. 3 the ASE spectra of 980 nm at the pump current of 35 A

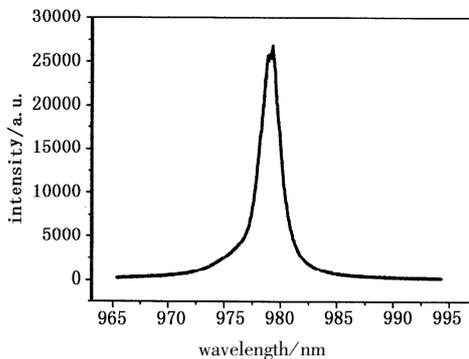


图 4 泵浦电流 36 A 时 980 nm 输出光谱图  
Fig. 4 the ASE spectra of 980 nm at the pump current of 36 A

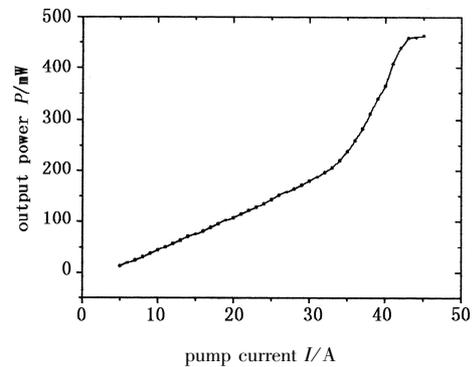


图 5 980 nm 光子晶体光纤激光器功率输出曲线  
Fig. 5 output power of 980 nm photonic crystal fiber laser as a function of pump current

### 2.2 单端输出方式

实验装置如图 6 所示,采用单端输出方式,光纤两端面分别研磨成  $0^\circ$  角与  $8^\circ$  角,  $0^\circ$  角端面(菲涅尔反射率  $R = 4\%$ )与 980 nm 高反镜  $M_3$  (同时镀有 1030 ~ 1100 nm 高透膜)作为光纤激光器的两腔镜,激光从光纤  $0^\circ$  角端面输出。实验中通过光谱仪观察 980 nm 激光光谱的变化情况。从光谱图中可知,当泵浦电流为 33 A 时,开始产生 980 nm 激光振荡;当泵浦电流小于 33 A 时,不能产生激光振荡,输出光为 ASE。当泵浦电流达到 33 A 时,光谱线宽变窄,开始有激光产生,不过输出光中还含有 ASE,此时对应的 915 nm 泵浦光的功率为 14.6 W。当泵浦电流增加为 34 A 时,从输出的光谱图中可以观察到明显的激光输出,如图 7 所示。由于  $M_3$  镜片镀有 980 nm 的高反膜,所以相对于双端输出时腔损耗减小,阈值降低。在实验中发现,随着泵浦电流的增大,在光谱图中也呈现出 980 nm 激光线宽变窄,ASE 相对下降的趋势。当泵浦电流达到最大值 45 A 时,相应泵浦功率为 18.8 W 时,获得输出功率为 543 mW 的 980 nm 单模连续激光输出。实验中测得最大泵浦电流为 45 A 时对应的光谱图如图 8 所示。此时输出的光谱图与以上双端输出时(如图 4 所示)测得的有所不同,这主要是由于腔镜的镀膜以及腔内的模式竞争引起的。在电流增加的过程中,运转于四能级的 1030 nm 波段一直没有激光产生,只是产生 ASE,由于腔内没有加入对 1030 nm 高度损耗的滤波片,980 nm 激光与 1030 nm ASE 的相

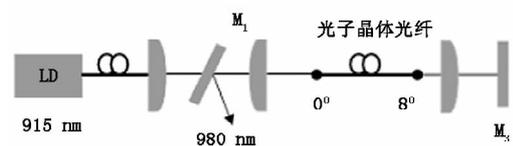


图 6 980 nm 光子晶体光纤激光器实验装置图  
Fig. 6 experimental setup of 980 nm photonic crystal fiber laser

对强度为 13.8 dB。实验中测得的 980 nm 单模激光输出功率与泵浦电流的关系如图 9 所示,泵浦光的阈值功率为 11.4 W,光纤激光器的斜效率为 11.6%。

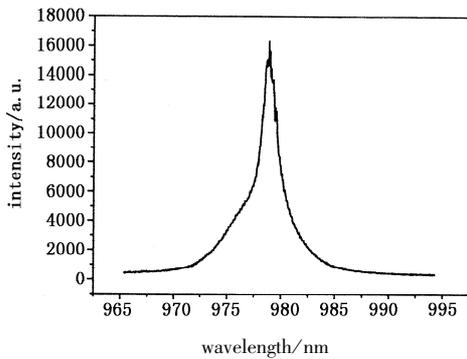


图 7 泵浦电流 34 A 时 980 nm 的输出光谱图

Fig. 7 the spectra of 980 nm at the pump current of 34 A

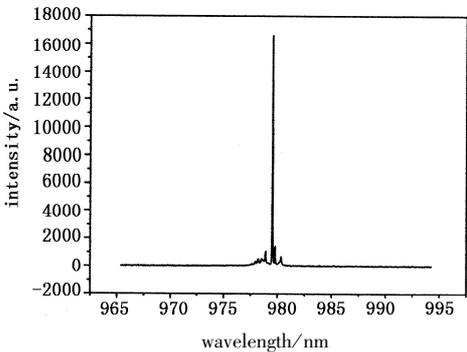


图 8 泵浦电流 45 A 时 980 nm 光子晶体光纤激光器光谱图

Fig. 8 spectrogram of 980 nm photonic crystal fiber laser at the pump current of 45 A

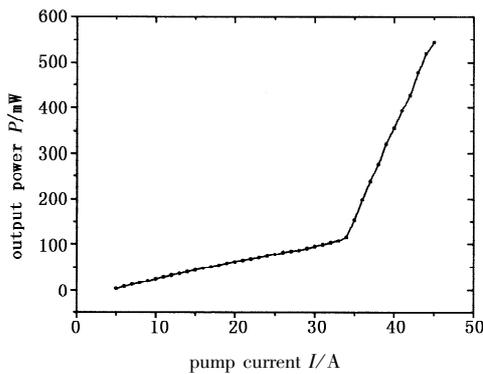


图 9 980 nm 光子晶体光纤激光器功率输出曲线

Fig. 9 output power of 980 nm photonic crystal fiber laser as a function of pump current

### 3 结论

实验中利用 915 nm LD 泵浦包层直径为 200  $\mu\text{m}$ , 芯径为 40  $\mu\text{m}$  的双包层光子晶体光纤,采用平-平腔结构,最终获得两端总输出功率 463.3 mW 的 980 nm 单模激光输出,斜效率为 17.8%。单端输出方式中,即 0° 角的光纤端面和高反镜作为腔镜时,980 nm 激光的输出功率达到 543 mW,相应的斜效率

为 11.6%。由于实验中泵浦源功率的原因,限制了 980 nm 输出功率的进一步提高,如果进一步提高泵浦源的泵浦功率,可以获得更高功率的 980 nm 激光输出。如果采用新型的非线性晶体如 BIBO, PPLN 等对 980 nm 激光进行倍频,可以得到 490 nm 的蓝绿光输出,下一步我们将开展此方面的研究工作。

### 参考文献:

- [1] L A Zenteno, J D Minelly, M Dejneka, et al. 0.65 W single-mode Yb-fiber laser at 980 nm pumped by 1.1 W Nd:YAG [J]. OSA, Trends in Optics and Photonics, 2000, 34: 440 - 443.
- [2] Nilsson J, Minelly J D, Paschotta R, et al. Ring-doped cladding pumped single-mode three-level fiber laser [J]. Optics Letters, 1998, 23(5): 355 - 357.
- [3] A Bouchier, G Lucas-leclin, P Georges. Single-mode Yb-doped fiber laser at 980 nm for efficient frequency-doubling [R]. Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 2005: MB29.
- [4] Bouchier A, Lucas-leclin G, Georges P. Single-mode Yb-doped fiber laser at 980 nm for efficient frequency-doubling [R]. OSA, Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 2005: 713.
- [5] R Selvas, J K Sahu, L B Fu, et al. High-power, low-noise, Yb-doped, cladding-pumped, three-level fiber sources at 980 nm [J]. Optics Letters, 2003, 28(13): 1093 - 1095.
- [6] Yi Jarkko, K H, Selvas R A, et al. 3.5 W 977 nm Cladding-pumped jacketed-air clad ytterbium-doped fiber laser [R]. Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 2003: 103.
- [7] Roeser Fabian, Jauregui Cesar, Limpert Jens, et al. 94 W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2008, 16(22): 17310 - 17318.
- [8] Boulet Johan, Zaouter Yoann, Desmarchelier Rudy, et al. High power ytterbium-doped rod-type three level photonic crystal fiber laser [J]. Optics Express, 2008, 16(22): 17891 - 17902.
- [9] Zou Shuzhen, Li Pingxue, Li Gang, et al. 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(Supplement): 72 - 76. (in Chinese) 邹淑珍, 李平雪, 李港, 等. 980 nm 单模掺镱光纤激光器 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊): 72 - 76.
- [10] Zou Shuzhen, Li Ping xue, Wang Ling hao, et al. Theoretical and experimental investigation of over 1 W single-mode Yb-Doped fiber laser at 980 nm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 36(s1): 48 - 51. (in Chinese) 邹淑珍, 李平雪, 王凌昊, 等. 瓦级 980 nm 掺镱单模光纤激光器理论及实验研究 [J]. 中国激光, 2008, 36(s1): 48 - 51.