

后腔镜对掺镱双包层光纤激光器输出特性影响研究

陈爽,冯莹,张俊

(国防科技大学 光电科学与工程学院,长沙 410073)

摘要:使用国产掺镱双包层光纤搭建了双包层激光器实验系统.将透射率不同的反射镜作为后腔镜进行了激光器输出激光光谱和功率测量.根据激光器数学模型和增益理论,分析了实验中后腔镜参量对激光器输出特性的影响,并深入讨论了后腔镜透射率与激光器输出波长之间的关系.实验表明:后腔镜与激光器输出激光功率和波长紧密联系,通过调节后腔镜的透射率可以优化系统的输出激光特性.

关键词:掺镱双包层光纤激光器;反射率;后腔镜

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)05-0901-5

0 引言

光纤激光器以其高效率、低阈值、可调谐、结构紧凑等优点,引起了人们的广泛关注.近年来随着双包层光纤的出现和包层泵浦技术的逐渐成熟,双包层光纤激光器得到了迅速发展,能将更多的泵浦激光耦合进光纤,使其输出功率迅速提升了 3 个数量级,并且最大输出功率记录还在不断被刷新^[1-3].由于镱离子具有较宽的吸收和发射谱、能级结构简单、无激发态吸收(ESA)和浓度淬灭等优点,掺镱光纤激光器逐渐成为掺杂光纤激光器的研究热点^[4-9].在大部分相关研究工作中,多是利用光纤端面的菲涅耳反射,将抛光处理的后端面作为后腔镜^[10].这种结构导致激光器输出存在不确定性,与掺杂浓度、长度以及泵浦光功率等诸多因素有关,不能实现对激光输出特性的有效控制.近年来,很多工作研究了光纤激光器后腔镜的影响,其中宁鼎等人就后腔镜对激光器特性的影响进行了实验研究^[11],李广慧、陈吉欣等人就后腔镜反射率对系统影响进行了详细的理论分析^[12-13].这些工作都没有深入讨论后腔镜反射率与波长之间的关系.本文采用国产双包层掺镱光纤搭建了双包层光纤激光器实验系统,将反射率不同的四组反射镜作为后腔镜进行了激光器输出激光光谱和功率测试,研究了后腔镜对激光器输出特性影响的规律.实验证明,通过设计后腔镜透射率曲线,可以有效地降低阈值、提高斜率效率、减弱模式竞争和控制输出波长.

1 实验装置

为了研究掺镱双包层光纤激光器后腔镜对系统输出特性的影响,搭建了如图 1 的端面泵浦光纤激

光器实验系统.泵浦源采用 LIMO 公司生产的中心波长为 976.9 nm 的多模半导体激光器,带宽 $\Delta\lambda = 2.9$ nm. 半导体激光器通过纤芯直径为 200 μm 的铠装尾纤输出,尾纤数值孔径 0.22. 增益介质为烽火公司生产的 D 形双包层掺镱光纤,光纤长 6 m,纤芯直径为 31.5 μm 、数值孔径为 0.24;D 形内包层为 400 \times 300 μm ,数值孔径为 0.37. 透镜耦合系统由两只透镜组成,将铠装尾纤输出的多模激光准直和聚焦后,从光纤端面耦合进内包层.

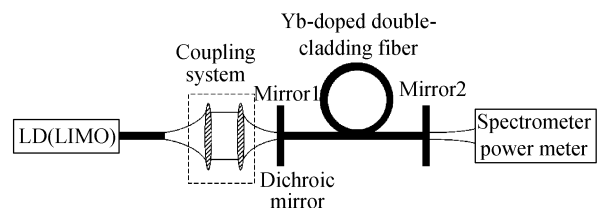


图 1 端面泵浦掺镱双包层光纤激光器实验系统
Fig. 1 Experimental setup of the Yb-doped double-clad fiber laser

激光器的谐振腔由前腔镜(镜 1)和后腔镜(镜 2)组成.其中镜 1 为紧贴光纤端面的双色镜,对 976 nm 附近泵浦激光透射率为 94%,对 1 050~1 100 nm 信号激光波段透射率则为 0.01%;同时实验中分别使用光纤端面和三个部分反射镜作为后腔镜,为了便于讨论分别将其定义为后腔镜 L_a 、 L_b 、 L_c 、 L_d :1)用抛光的光纤端面直接作为后腔镜 L_a ,于是后腔镜 L_a 对 976 nm 泵浦激光反射率 R_3 和对 1 050~1 100 nm 信号激光波段反射率 R_2 均为菲涅耳反射率, $R_2 = R_3 = 0.04$; 2)光纤后端面紧贴一部分反射镜作为后腔镜 L_b ,该反射镜在较宽波段内(950~1 100 nm)有均匀的反射率,参量为 $R_2 = R_3 = 0.10$; 3)后腔镜 L_c 与 L_b 一样,在宽带内反射均匀,但反射率为 50%,可表示为 $R_2 = R_3 = 0.50$; 4)后腔镜 L_d 则表现出特殊性,在 976 nm 泵浦激光波长附近表现出高反 $R_3 = 0.93$,在 1 020 nm 和 1 100 nm 处分别有 60%和 40%的反射率(如图 2).

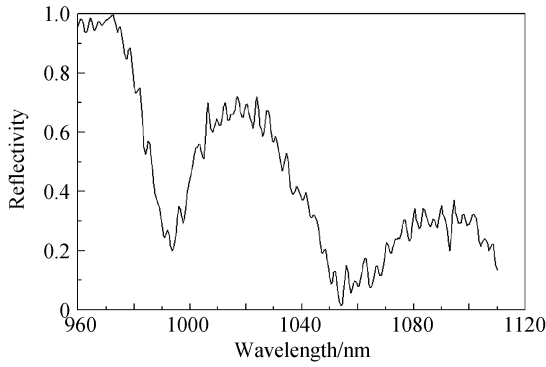


图2 后腔镜 L_d 的反射谱线
Fig.2 The reflectivity spectrum of the back-cavity mirror L_d

另外,实验中为了研究不同腔镜对激光器输出特性的影响,使用上海市计量测试技术研究所生产的 SJG-100A 激光功率计进行功率检测,同时通过普通光纤将输出激光衰减耦合进 AGILENT86142A 型光纤光谱仪进行光谱测量.

2 实验结果

采用图 1 的实验装置,通过光功率计对使用 L_a 、 L_b 、 L_c 、 L_d 四个后腔镜时激光器输出激光的功率和阈值等参量分别进行了测试(实验结果如表 1).在不变化其他参量的情况下,更换不同的反射镜紧贴光纤后端面接入系统,激光器输出特性有较大差异.首先,激光器阈值泵浦光功率不同,使用 50% 均匀反射的后腔镜 L_c 时,阈值入纤泵浦光功率仅为 0.80 W,而利用抛光的光纤端面 4% 菲涅耳反射的后腔镜 L_a 则阈值较高,达到了 1.64 W.从 3.7 W 泵浦激光注入光纤测得的输出功率值来看,后腔镜 L_a 则能获得最大的 1.84 W 的输出功率,而后腔镜 L_d 最低.通过功率的多点采样,处理后得到系统的斜率效率,直接使用抛光的光纤端面作为后腔镜时为最大,达到 86.67%,而 L_c 和 L_d 接入时相对较小.

表 1 实验测试结果列表

后腔镜	阈值(入纤功率)/W	激光波长/nm	入纤泵浦光功率为 3.7 W 时的输出激光功率/W	对入纤泵浦光功率的斜率效率
L_a	1.64	1 075	1.84	0.866 7
L_b	1.28	1 080	1.70	0.712 0
L_c	0.80	1 092	1.69	0.587 3
L_d	1.02	1 093	1.60	0.596 8

同时,用普通光纤将输出激光耦合进入光谱仪进行测量.从测量结果(如图 3)可以看出双包层光

纤激光器系统可以获得较为稳定的多纵模连续激光输出,而四组后腔镜用于激光器系统时测得的输出

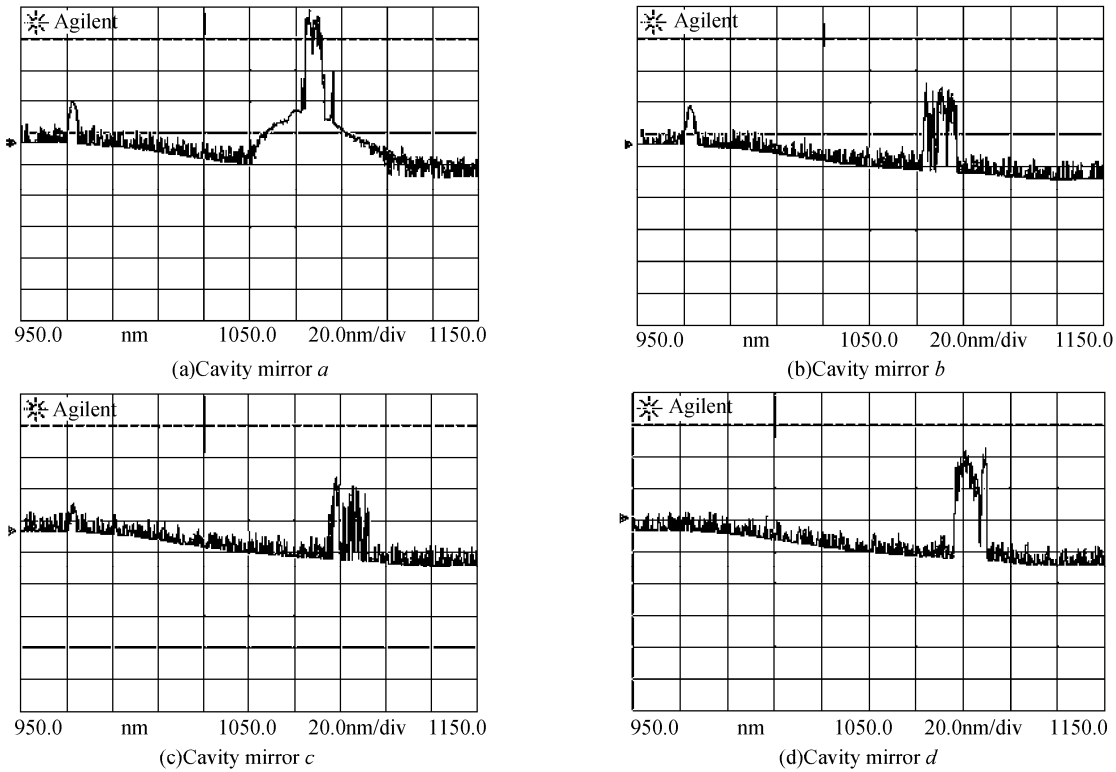


图 3 输出激光光谱图
Fig.3 Laser spectrums for different back-cavity mirrors

激光光谱不同,波长也不一致. 实验中还发现,用 L_a 、 L_b 、 L_c 三组后腔镜时,输出激光功率均有一点波动,存在着模式竞争,而用 L_d 腔镜时,则能获得波长和功率均较为稳定的多纵模激光输出. 对比 L_a 、 L_b 、 L_c 后腔镜输出激光光谱还可以看到,当后腔镜反射率在较宽带内均匀变化时,输出激光波长随反射率变化,反射率越大,激光波长越长;用 50% 反射率的腔镜时,输出波长达到了 1 092 nm. 用光纤端面作为后腔镜会导致大量的 ASE 荧光和残余泵浦激光输出,随着 R_3 增大,残余泵浦激光减少;增大 R_2 则使得 ASE 荧光减少,尤其是使用后腔镜 L_d 的时候既没有残余泵浦激光输出,而且也没有 ASE 荧光输出,这主要得益于后腔镜 L_d 特殊的反射率谱线.

3 分析与讨论

从实验可以得出,随着 R_2 增大,输出激光功率值和斜率效率单调下降. 这说明应用中,如果只是追求输出功率的情况下,可以将抛光的光纤端面 4% 的菲涅耳反射作为后腔镜. 但是这种腔镜结构往往很难得到窄带和稳定的激光输出,同时也不易实现对激光器波长的控制. 实验中后腔镜 L_c 得到的阈值泵浦功率最低,表明后腔镜对泵浦激光的反射率 R_3 直接决定了激光器阈值泵浦功率的大小. 增大 R_3 则可以使得单程没被光纤完全吸收的剩余泵浦激光更多地返回光纤被更充分吸收,达到降低阈值和提高能量转换效率的目的. 因此在实际研究中,应同时考虑降低 R_2 和增大 R_3 , 获得较高的斜率效率和能量转换效率. 但是,4% 均匀反射的抛光光纤端面直接用作后腔镜则无法实现优化,有其局限性.

另外,在实验中使用后腔镜 L_a 、 L_b 和 L_c 获得的激光输出均不稳定,存在较强的模式竞争,仅有使用后腔镜 L_d 时能得到波长和功率均稳定的多纵模激光输出,输出波长在 1 093 nm 附近,并且没有剩余的泵浦激光和 ASE 荧光. 这些可以从后腔镜 L_d 特殊的反射率曲线得到解释(如图 2):1)后腔镜 L_d 在 976 nm 附近泵浦光波段表现出高反,使得大部分剩余泵浦激光返回,降低了阈值功率;2)在 1 050 ~ 1 100 nm 波段并不是如 L_a 、 L_b 和 L_c 是一致的反射率,而表现出差异:在 1 093 nm 附近的反射率较其他波长(如 1 075 nm、1 080 nm)大很多,这使得在 1 093 nm 处较附近波长能获得较大增益,很容易在模式竞争中占据优势. 以上两点则保证了使用后腔镜 L_d 时的低阈值功率以及在 1 093 nm 处稳定的多纵模激光输出.

此外还有一点不能忽视:后腔镜 L_a 、 L_b 和 L_c 都是在较宽带内(覆盖 976 nm 以及 1 000 ~ 1 100 nm

波段)有着均匀反射率的反射镜,并没有加入类似后腔镜 L_d 的波长选择机制;然而在不改变系统其他参量时,激光器输出激光波长存在差异(如图 3),分别为 1 075 nm、1 080 nm 和 1 092 nm. 但近年来关于双包层光纤激光器后腔镜的讨论多与功率相关,很少涉及波长的问题,尤其是针对 R_2 和 R_3 均匀变化的情况的分析更是鲜有报道. 为了解决这个问题,必须从激光器基本理论出发进行讨论.

根据激光原理,在激光器腔内当增益大于损耗时可以获得振荡,并且通过模式竞争,增益最大的波长处可输出激光^[9]. 参照掺镱光纤放大器的物理模型^[10],在光纤 z 处信号激光获得的增益可以表示为

$$g(z, \lambda) = (\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda))N_2(z) - \sigma_a(\lambda)N_1(z) - \alpha(z) \quad (1)$$

式中, $\sigma_e(\lambda)$ 和 $\sigma_a(\lambda)$ 分别表示镱离子在波长 λ 处的发射截面和吸收截面, $N_2(z)$ 为上能级离子数, $N(z)$ 为总粒子数且 $N(z) = N_1(z) + N_2(z)$. 所以

$$\frac{\partial g(z, \lambda)}{\partial \lambda} = \frac{d\sigma_e(\lambda)}{d\lambda}N_2(z) - \frac{d\sigma_a(\lambda)}{d\lambda}N_1(z) = 0 \quad (2)$$

于是可以得到

$$\frac{\frac{d\sigma_e(\lambda)}{d\lambda}}{\frac{d\sigma_a(\lambda)}{d\lambda}} = \frac{N_1(z)}{N_2(z)} \quad (3)$$

这里,式(3)可以理解为:能获得增益最大的波长由镱离子吸收、发射截面与波长的关系以及上能级粒子数 N_2 的大小直接决定.

同时根据物理模型,将后腔镜 L_a 、 L_b 和 L_c 的参量带入描述掺镱光纤激光器速率方程组^[15]并用龙格库塔法求解,对上能级粒子数(N_2)沿光纤的分布进行数值模拟则可得到如图 4 曲线. 曲线表明:后腔镜不同的时候, N_2 随着后腔镜反射率的增加而显著减小.

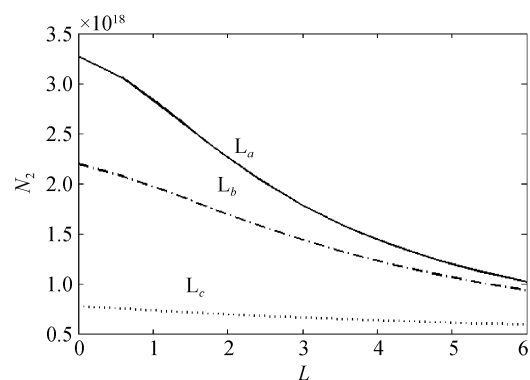


图 4 不同腔镜时上能级粒子数分布曲线

Fig. 4 Population density N_2 along the fiber for cavity mirror L_a , L_b and L_c

根据镱离子的吸收截面和发射截面与波长的关

系^[4](如图5,实线是吸收截面,虚线是发射截面),

当 N_2 减小的时候, $\frac{N_1}{N_2}$ 增大,于是 $\frac{d\sigma_e(\lambda)}{d\sigma_a(\lambda)}$ 也将增大

才能使得式(2)成立,于是获得最大增益的波长就会变化(如图5中从(a)点到(b)点,再到(c)点),因此激光器输出波长也变化. 实验和分析说明,当后腔镜反射率从4%变化为10%和50%的时候,即使没有对波长进行控制的情况下,输出激光中心波长也会相应变化,表现出差异.

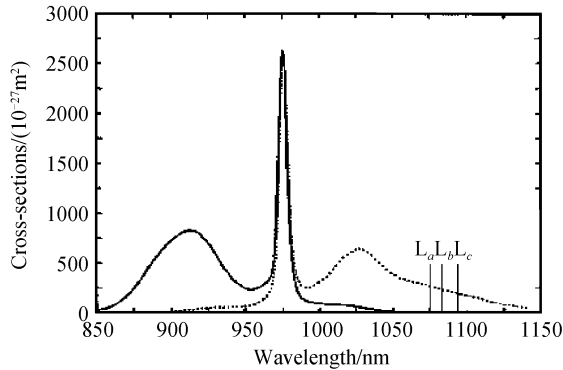


图5 镱离子吸收和发射截面谱及不同腔镜时吸收和发射截面的情况

Fig.5 Cross section of Yb^{3+} -doped silica and the difference for cavity mirror L_a , L_b and L_c

4 结论

搭建了端面泵浦掺镱双包层光纤激光器实验系统,研究了不同的后腔镜对双包层掺镱光纤激光器输出特性的影响,将不同的反射镜作为后腔镜,测量了它们的激光光谱、功率等参量. 讨论了后腔镜参量与激光器输出特性之间的关系,尤其重点和深入分析了不施加波长控制的激光器中,后腔镜对激光器输出波长的影响.

实验中可以通过设计腔镜参量获得需要的激光输出特性;同时通过设计腔镜(R_2 和 R_3),可以提高激光器的效率、获得稳定的纵模输出,优化系统的性能;尤其在大功率光纤激光器设计中,后腔镜的作用更加重要;可以通过增大 R_3 降低阈值,减小 R_2 来增大输出激光功率;同时针对对波长有特殊要求的情况,可以设计后腔镜反射率曲线,降低腔内的模式竞争,获得稳定的激光输出.

参考文献

[1] LOU Qi-hong, ZHOU Jun, ZHU Jian-qiang, *et al.* Recent progress of high-power fiber lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2):135-138.
楼祺洪,周军,朱健强,等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(2):135-138.

[2] JEONG Y, SAHU J K. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1kW continuous-wave output power [J]. *Electronics*

Letters, 2004, **40**(8):470-472.

- [3] JEONG Y, SAHU J K. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Optic Express*, 2004, **12**(25):6088-6092.
- [4] PASCHOTTA R, NILSSON J, TROPPER A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1997, **33**(7):1049-4056.
- [5] SU Hong-xin, RUAN Shuang-chen, LÜ Ke-cheng, *et al.* Mode competition of Yb^{3+} -doped double clad fiber laser with a Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):405-408.
苏红新,阮双琛,吕可诚,等. F-P腔掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器中的模式竞争[J]. 光子学报, 2003, **32**(4):405-408.
- [6] XIE Chun-xia, LÜ Fu-yun, WANG Jian, *et al.* Experimental study on large-mode-area Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5):645-647.
谢春霞,吕福云,王健,等. 大模面积掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的实验研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(5):645-647.
- [7] ZHANG Liang, ZHANG Jian, Qin Li, *et al.* Study on high-energy Ytterbium-ions-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7):975-979.
张亮,张健,秦莉,等. 高能掺镱离子光纤激光器的研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(7):975-979.
- [8] DONG Shu-fu, WANG Yi-shan, SHEN Hua, *et al.* High power single mode $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$ co-doped double cladding fiber lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1605-1609.
董舒福,王屹山,沈华,等. 高功率单模 $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤激光器[J]. 光子学报, 2005, **34**(11):1605-1609.
- [9] YANG Lin-zhen, CHEN Guo-fu, WANG Yi-shan, *et al.* Experimental of study of ultra short pulse Yb^{3+} -doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):333-335.
杨玲珍,陈国夫,王屹山,等. 超短脉冲掺 Yb^{3+} 光纤激光器实验研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(3):333-335.
- [10] XUE Dong, LOU Qi-hong, ZHOU Jun, *et al.* Properties of ytterbium-doped double clad fiber made in China[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5):665-668.
薛冬,楼祺洪,周军,等. 国产掺镱双包层光纤的激光特性[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(5):665-668.
- [11] NING Ding, HUANG Bang-cai, XIANG Yang, *et al.* Effect of back-cavity mirror on Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):314-316.
宁鼎,黄榜才,项阳,等. 后腔镜对掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器性能影响的研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(3):314-316.
- [12] XIE Chun-xia, LÜ Fu-yun, WANG Jian, *et al.* Two-dichroic-mirror cavity Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2006, **39**(1):58-61.
谢春霞,吕福云,王健,等. 双二色镜腔的国产掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2006, **39**(1):58-61.
- [13] CHEN Ji-xin, SUI Zhan, CHEN Fu-shen, *et al.* End-pumped Yb^{3+} doped double clad fiber laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(4):315-318.
陈吉欣,隋展,陈福深,等. 端面泵浦掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器[J]. 应用光学, 2006, **27**(4):315-318.

- [14] ZHOU Bin-kun, GAO Yi-zhi, CHEN Ti-rong, *et al.*. Principle of lasers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
周炳琨,高以智,陈侗嵘,等.激光原理[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [15] KELSON I, HARDY A. Strongly pumped fiber lasers[J]. *IEEE Quantum Electron*, 1998,**34**(9):1570-1577.

Effect of Back-cavity Mirror on Output Characteristics of Yb³⁺-Doped Double-clad Fiber Laser

CHEN Shuang, FENG Ying, ZHANG Jun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Received date:2006-11-21

Abstract: The Yb³⁺-Doped Double-Clad Fiber Laser was constructed by using Yb³⁺-Doped Double-Clad Fiber made in China and a set of back-cavity mirrors with different reflectivity ratios. The output power and spectrum were measured. The effect of back-cavity mirror on the output characteristics of the laser had been studied theoretically and experimentally. The relationship of the reflectivity ratio of the back-cavity mirror and the wavelength of the output laser beam had been discussed deeply. It is found that the output characteristics of the fiber laser can be better by designing the reflectivity ratio of the back-cavity mirror.

Key words: Yb³⁺-doped double-clad fiber laser; Reflectivity ratio; Back-cavity mirror



CHEN Shuang was born in 1979. He received his MS degree from National University of Defense Technology in 2004. Now he is a candidate for Ph. D degree in National University of Defense Technology. His major research field is Double-Clad fiber laser and fiber amplifier.