

文章编号: 0258-7025(2004)04-0403-04

掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的多波长输出

项 阳¹, 许兆文¹, 宁 鼎², 范万德¹, 袁树忠¹, 董孝义¹

(¹ 南开大学现代光学所, 天津 300071; ² 信息产业部第 46 研究所, 天津 300220)

摘要 双包层光纤激光器不再要求抽运光是单模激光, 而且基本上在沿光纤整个长度上抽运, 从而大幅度地提高了激光转换效率。给出了一种由半导体激光器(LD)抽运的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器, 利用 976 nm 的抽运光, 对双包层光纤进行端抽运, 光纤后端与双色镜构成 Fabry-Perot 干涉仪兼作反馈腔镜, 得到波长为 1085 nm, 1090 nm, 1095 nm 和 1100 nm 的激光输出, 每个波长激光的线宽为 0.33 nm, 输出总激光功率为 1.2 W, 信噪比超过 20 dB, 斜率效率为 52%。

关键词 光电子学; 多波长; 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器

中图分类号 TN 248 **文献标识码** A

Yb^{3+} -Doped Multi-Wavelength Double Clad Fiber Laser

XIANG Yang¹, XU Zhao-wen¹, NING Ding²,

FAN Wan-de¹, YUAN Shu-zhong¹, DONG Xiao-yi¹

¹ Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

² Electronics 46th Institute, Ministry of Information Industry, Tianjin 300220, China

Abstract For the double clad fiber laser, differ from ordinary fiber laser, the requirement of a single mode for pumping the fiber laser is needless, furthermore, the pump beam coupling into fiber along nearly whole fiber, consequently, the laser conversion efficiency is improved. In this paper, a novel Yb^{3+} -doped multi-wavelength double clad laser pumped by 976 nm laser diode is presented. The output wavelength are 1085, 1090, 1095 and 1100 nm. The laser exhibits 0.33 nm line-width, 1.2 W laser out power, 20 dB signal-to-noise (SNR) and 52% slope efficiency.

Key words optoelectronics; multi-wavelength; Yb^{3+} -doped double clad fiber laser

1 引 言

近年来双包层光纤激光器的研究是光电子和激光领域的热点, 这种新型的双包层光纤比普通单模光纤增加了一个内包层。其横截面尺寸和数值孔径远大于纤芯, 对于所产生的激光波长, 内包层与掺稀土离子纤芯构成了完善的单模光波导; 同时它又与外包层构成了传输抽运光功率的多模光波导。该结构的优点是: 不再要求抽运光是单模激光, 而且基本上在沿光纤整个长度上抽运, 从而大幅度地提高了激光转换效率, 特别是当纤芯和包层的对称性受到很小的破坏时, 对抽运光的吸收会大大增加^[1], 因此

可以设计出各种形状的内包层, 与作为抽运源的激光二极管更好地匹配, 使多模抽运光更有效地耦合, 将连续激光输出提高到几十瓦的量级。利用双包层光纤还可以制作调 Q 激光器, 获得上千瓦峰值功率的脉冲输出^[2]。

基于两个平面腔镜的端抽运的双包层光纤激光器由于抽运光很强及光学镀膜的限制, 会出现多个模式共存的现象, 有报道称用这个波段的光纤光栅^[3]或 Littrow-Littman 镜^[4]作为选频的方法。这里我们给出了一种新颖的双包层多波长光纤激光器, 它是由半导体激光器抽运的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器, 利用 976 nm 的抽运光, 对双包层光纤进行

收稿日期: 2002-11-29; 收到修改稿日期: 2003-02-25

作者简介: 项 阳(1968—), 男, 南开大学现代光学研究所博士生, 主要从事光电子和光纤通信的研究工作。E-mail: xiang_yang@eyou.com

端抽运, 光纤后端与双色镜构成 Fabry-Perot 干涉仪兼作反馈腔镜, 得到波长分别为 1085 nm, 1090 nm, 1095 nm 和 1100 nm 的激光输出, 每个波长的激光的线宽为 0.33 nm, 最高总激光功率为 1.2 W, 信噪比超过 20 dB, 斜率效率为 52%。

2 理论分析

对于端抽运结构的双包层光纤激光器, 其运行的理论模型有很多讨论^[5,6], 其物理模型如图 1, 前向和后向的输出能量由下式给出^[6]

$$P^+(L) = -P_0(1 + R_2) + \sqrt{P_0^2(1 + R_2)^2 + 4R_2P^-(0)[P_0 + R_1P^-(0) + P_0R_1]}/2R_2 \quad (1)$$

$$P^-(0) = -P_0(1 + R_1) + \sqrt{P_0^2(1 + R_1)^2 + 4R_1P^+(L)[P_0 + R_2P^+(L) + P_0R_2]}/2R_1 \quad (2)$$

其中 L 为光纤激光器的腔长, R_1 和 R_2 分别为左右端反射镜的反射率, P_0 为抽运入纤功率, $P^+(L)$ 和 $P^-(L)$ 分别为腔中前向和后向抽运光功率沿光纤的分布, P_{out}^+ 和 P_{out}^- 分别为正反向激光输出功率, 其中 R_2 是实验中自由端面与后腔镜共同组成的 Fabry-Perot 滤波器的有效反射率, Fabry-Perot 滤波器的有效反射率 R_f 由下面的公式计算, 在整个激光系统中相当于式(1), (2) 中的 R_2

$$R_f = 1 \times \left[1 + \frac{(1 - R_a R_b)^2}{4R_a R_b \sin^2(\delta/2)} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2nd \cos i \quad (4)$$

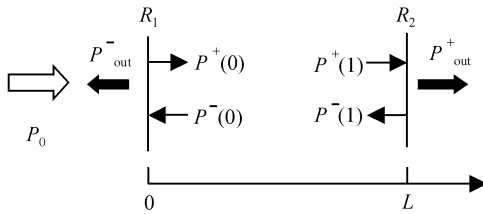


图 1 双包层激光器端抽运运行的理论模型
Fig. 1 Theoretical model of end-pumped double-clad fiber laser

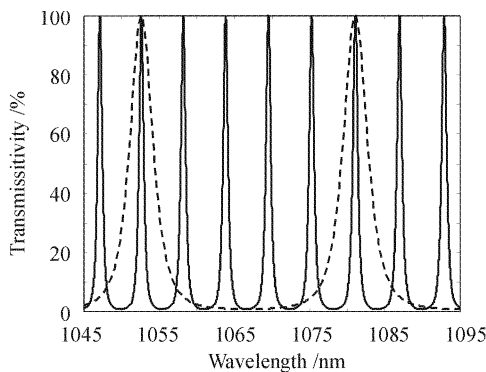


图 2 Fabry-Perot 滤波器透过率与 d 的关系
虚线: $d = 100 \mu\text{m}$; 实线: $d = 10 \mu\text{m}$
Fig. 2 Transmissivity vs d of F-P filter
dot line: transmissivity when $d = 100 \mu\text{m}$;
solid line: transmissivity when $d = 10 \mu\text{m}$

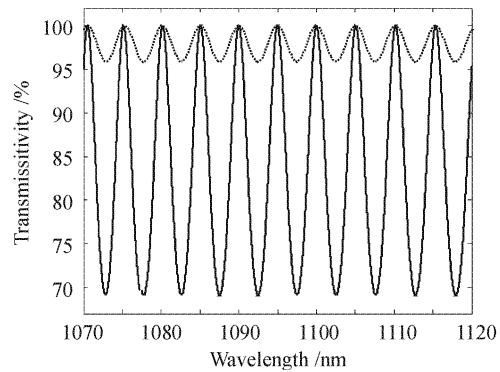


图 3 Fabry-Perot 滤波器透过率与两个反射率之间的关系

虚线: R_a, R_b 分别为 0.04, 0.23 时的透过率;
实线: R_a, R_b 分别为 0.4, 0.6 时的透过率

Fig. 3 Transmissivity vs R_a, R_b of F-P filter
dot line: transmissivity when $R_a = 0.04, R_b = 0.23$;
solid line: transmissivity when $R_a = 0.4, R_b = 0.6$

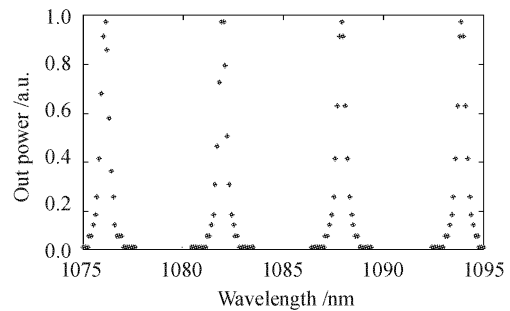


图 4 激光输出的能量数值模拟
Fig. 4 Calculated laser out power vs wavelength

R_a 和 R_b 分别为光纤端面的反射率(取 0.04) 和后腔镜的反射率(取 0.23), i 为入射角, 实验中, 光纤端面法线与后腔镜垂直, i 取为 0。经过数值计算, 可以得到如图 2 的梳状谱, 图中 d 为光纤后端面和后腔镜的距离, 可以看出不同的 d 值对应着不同的滤波通道间隔和通道宽度。图 3 给出光纤后端面与后腔镜之间的距离相同时, 两个反射面的反射率对于透过率的影响。计算了两个反射率分别为 0.04,

0.23 和 0.4, 0.6 时的滤波器透射率曲线,可以看出两个反射率相差很大时,对透过率的影响很大。当双包层激光器处于工作状态时,由于谐振腔不是最佳的状态,所以存在很强的模式竞争,当后腔镜调到适当的位置时,由于 Fabry-Perot 滤波器的作用,抑制了一些模式,同时使一些模式在竞争中得到增强,出现了多波长的激光输出。将入纤抽运光能量代入式(1),(2),可以得到图 4 中 4 个波长的数值计算结果。

3 实验装置

实验装置如图 5 所示,用高功率半导体激光器作抽运光源,中心波长为 976 nm,和 Yb³⁺ 的一个吸收峰相同。半导体激光器与双包层光纤耦合方式采

用端抽运方式,这里使用的是自行设计加工的透镜——非球面透镜的聚焦系统,其作用是使抽运光源输出的光束经过这个抽运耦合系统后与双包层光纤的内包层可接收的光锥面匹配。双包层光纤是自行研制的新型的内包层为矩形的掺 Yb³⁺ 双包层光纤,其 Yb³⁺ 掺杂浓度为 2×10^{-3} ,长度为 30 m,其纤芯为圆形,直径 7 μm ,矩形内包层尺寸为 350 $\mu\text{m} \times 175 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.35。两个平面双色镜构成激光谐振腔,其中前腔镜对抽运光中心波长 976 nm 附近的透过率为 96%,波长长于 1060 nm 时反射率高达 99%以上,后腔镜对中心波长 976 nm 附近的反射率为 90%以上,波长长于 1060 nm 的波段的反射率为 23%,透过率为 77%。采用三个精密的光纤 5 维微调架调整整个系统,使之工作在最佳状态。激光输出通过光功率计和光谱分析仪测量。

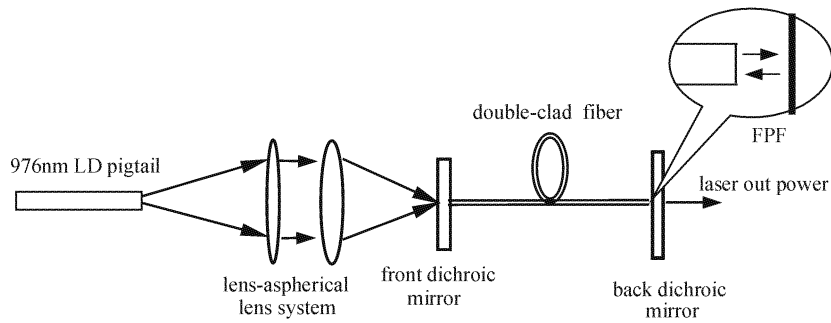


图 5 包层抽运掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器实验装置图
Fig. 5 Setup of Yb³⁺-doped double-clad fiber laser

4 实验结果

实验中用的双包层光纤两端经过抛光机精确抛光加工,使端面与光纤轴线成 90°,精确调整双包层光纤前端与前腔镜使它们之间紧密结合,用精度为 0.1 μm 的 5 维光纤调节架精确调节光纤端面与后腔镜的距离,并使光纤轴线尽量与后腔镜面垂直。

通过耦合系统将抽运光注入光纤,增大 LD 的驱动电流,通过光谱仪可以看到荧光光谱,逐渐增大电流得到阈值条件下的激光光谱如图 6,其 3 dB 带宽为 0.33 nm,通过调整后腔镜和光纤后端面的距离得到 4 个间隔相同的激光输出如图 7。等间隔加大抽运激光的电流,得到 4 个激光波长的输出,与理论分析符合得很好,激光输出的总功率最高为 1.2 W,在

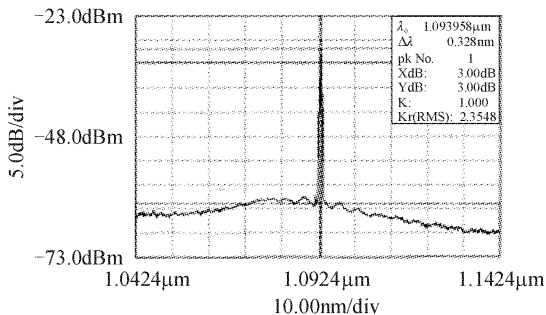


图 6 阈值状态激光输出谱
Fig. 6 Spectrum of threshold pumping laser

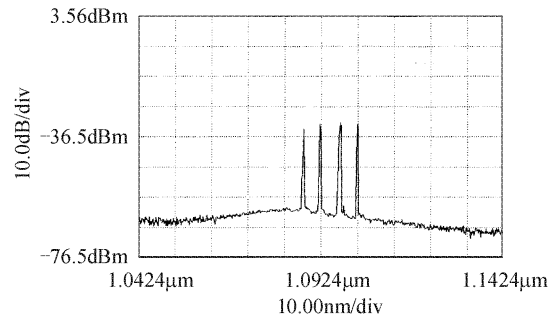


图 7 光纤激光器的多波长输出光谱
Fig. 7 Spectrum of multi-wavelength laser

双包层光纤前端靠近前腔镜 10 cm 处截断光纤,在不同驱动电流下测得各个点的入纤功率。图 8 给出的是激光输出特性曲线。由于掺镱光纤的放大自发辐射(ASE)谱很宽,可以通过改进实验装置以调整 d 和后腔镜的反射率来给出各种激光输出,得到间

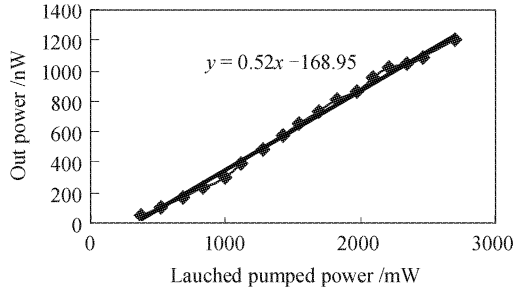


图 8 实验得到的激光输出特性

Fig. 8 Efficiency of double-clad fiber laser, the solid line is the linear fit to the experimental values

隔更合理、波长更多的这一波段的高功率激光输出,有望在空间数字波分复用光通信上得到应用。

参 考 文 献

- 1 Brian Rossi. Commercial fiber lasers take on industrial markets [J]. *Laser Focus World*, 1997, **33**(5):143~149
- 2 Z. J. Chen, A. B. Grudinin, J. Porta *et al.*. Enhanced Q-switching in double-clad fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(6):454~456
- 3 M. J. F. Digonnet. Theory of super fluorescent fiber laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(11):1631~1639
- 4 Su Hongxin, Lü Kecheng, Yan Peiguang *et al.*. DBR Yb-doped double-clad fiber laser operating at 1.06 μm [C]. *SPIE*, 2002, **4914**:426~429
- 5 L. Zenteno. High-power double-clad fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(9):1435~1446
- 6 N. S. Kim, T. Hamada, M. Prabhu *et al.*. Numerical analysis and experimental results of output performance for Nd-doped double-clad fiber lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **180**:329~337