

掺 Yb^{3+} 双包层石英光纤的研制及其 激光特性*

宁 鼎^{1,2} 王文涛¹ 阮 灵¹ 赵金岐¹ 刘 昆¹ 吴少波¹
刘伟伟² 李乙钢² 傅成鹏² 吕可诚² 董孝义²

(¹ 信息产业部电子第四十六研究所 天津 300220; ² 南开大学现代光学所 天津 300071)

提要 用 MCVD 工艺加溶液掺杂法研制成功了大几何尺寸、大数值孔径内包层的掺 Yb^{3+} 双包层石英光纤, 内包层直径 $125\ \mu\text{m}$, 数值孔径达 0.36。完成了包层抽运光纤激光器的初步实验, 在波长 $1.06\ \mu\text{m}$ 处获得 220 mW 的激光输出, 光-光转换效率为 26%。

关键词 Yb^{3+} 掺杂, 双包层光纤, 包层抽运, 光纤激光器

1 引 言

光纤激光器以其低阈值、高效率、窄线宽、可调谐性等优点受到普遍重视, 并逐步商用化。但是, 由于单模光纤的纤芯较小(直径 $4\sim 6\ \mu\text{m}$), 抽运功率很难有效地耦合到纤芯中。因此, 目前已研制成功的光纤激光器只能称其为低功率的光子器件。

面对这种情况, 近年来国际上发展了一种新型双包层光纤。利用包层抽运技术, 克服了上述单包层的缺点, 使输出功率猛然提高 3~4 个数量级, 大大推动了高功率光纤激光器的发展^[1-3]。双包层光纤与传统意义的光纤区别在于: 通过光纤结构设计和选择合适的材料, 在掺稀土离子的单模纤芯外面构成一个可传输多模抽运光的通道——内包层。以多模大功率半导体激光器做抽运源, 将抽运光有效地耦合到内包层中。当其沿光纤长度方向传播的过程中, 多次穿越纤芯被稀土离子所吸收。使用双包层掺稀土离子光纤制成的包层抽运光纤激光器主要优点是: 不再要求抽运光是单模激光, 而且抽运过程是沿光纤整个长度上进行, 使光转换效率大幅度提高。

掺 Yb^{3+} 石英光纤的特点是: 增益带宽宽、量子效率高以及无激发态吸收、无浓度淬灭等, 而且激光输出波长在 $1\sim 1.15\ \mu\text{m}$ 可调谐^[2,4]。掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器, 其大横向尺寸、大数值孔径的内包层易于接收大量抽运光并高效率地转换为单模激光, 使输出功率得到提升。目前国际上连续输出功率 $10\sim 20\ \text{W}$ 光纤激光器已达到商用水平, 实验室水平已达到 $110\ \text{W}$ ^[5]。这种高功率输出的双包层光纤激光器在光纤 Raman 放大器、掺铒光纤放大器(EDFA)、空间光通信、光传感、航天航空、生命科学、工业加工等领域将获得广泛应用, 因此, 已引起了人们极大

* 国家自然科学基金(编号: 69877006)资助项目。

收稿日期: 2000-04-18; 收到修改稿日期: 2000-06-18

的关注。利用 MCVD 工艺加溶液掺杂的技术,研制成功了大尺寸、大数值孔径内包层的掺 Yb^{3+} 双包层光纤。本文阐述了该光纤的设计思想和制作工艺过程。在对光纤各项性能指标测试分析的基础上,完成了包层抽运激光实验,获得了 220 mW 的激光输出,光-光转换效率达 26%。

2 掺 Yb^{3+} 双包层石英光纤的研制

2.1 光纤的设计

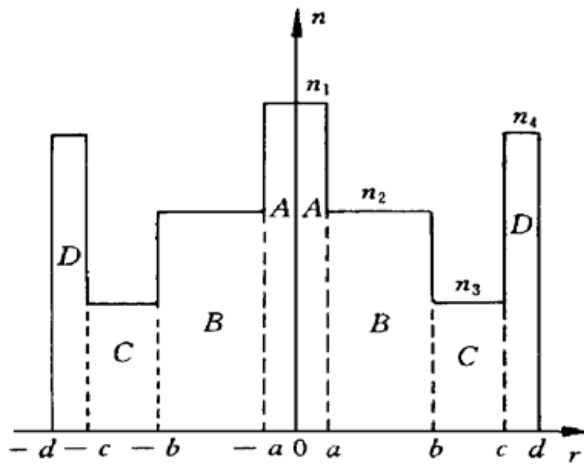


图 1 双包层光纤折射率示意图

A: 纤芯; B: 内包层; C: 外包层; D: 保护涂层

Fig. 1 Schematic diagram of double-clad fiber refractive index

A: fiber core; B: inner cladding;

C: outer cladding; D: protective coating

图 1 是掺 Yb^{3+} 双包层石英光纤折射率分布示意图。图中 $2a$, $2b$, $2c$, $2d$ 分别为纤芯直径、内包层直径、外包层直径、保护涂层直径。各部分的折射率分别为 n_1, n_2, n_3, n_4 。

纤芯为增益介质,即图 1 中的 A 部分。它是产生并传输单模激光的区域,根据掺 Yb^{3+} 光纤激光器的激光输出波长范围为 $1 \sim 1.15 \mu\text{m}$,要求光纤的截止波长应设计短于 980 nm 。在单模传输条件下,光纤的截止波长 λ_c ,数值孔径 NA ,纤芯直径 $2a$ 应满足关系

$$\lambda_c = \pi 2a NA / V_c \quad (1)$$

其中 $V_c = 2.405$ 。为便于耦合, NA 应比常规单模光纤略大为好。经综合考虑后,设计参数确定为: $2a = 5 \pm 1 \mu\text{m}$, $NA = 0.15 \pm 0.01$ 。根据数值孔径的定义

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2)$$

其中 n_1, n_2 分别为纤芯和包层的折射率。在工艺上主要通过调整 $\text{GeO}_2, \text{P}_2\text{O}_5$ 在 SiO_2 基质中的掺入量和沉积层数来调整数值孔径和 $2a$,最终达到控制 $\lambda_c < 980 \text{ nm}$ 的目的。另外,对芯部用溶液法掺 Yb^{3+} 的要求是:掺入浓度高并沿光纤径向、纵向尽可能均匀。这主要取决于芯部疏松层的致密度、配液的浓度及浸泡时间、脱水过程的温度和通入工艺气体配比等因素的影响。为满足激光实验的要求,一般掺入浓度应大于 5×10^{-4} 。

内包层在纤芯外部,即图 1 中的 B 部分。它既是单模纤芯的低折射率包层,本身又是传输大功率抽运光的通道。通常要求内包层具有大的几何尺寸和大的数值孔径,这对于多模抽运光的耦合将十分有利。为与抽运激光器的尾纤相适应,设计了圆形的 SiO_2 内包层,直径 $2b = 125 \pm 3 \mu\text{m}$,折射率为 1.457。为了增加内包层的数值孔径,选用了一种折射率约 1.41 的硅橡胶材料做外包层(图 1 中 C 部分),直径 $2c = 200 \pm 5 \mu\text{m}$ 。预期内包层的数值孔径可达 0.37。在物理上意味着:以光纤几何轴线为中心,张角为 43° 的圆锥体内的入射光都能耦合进入内包层成为导模抽运光,有效地激励增益介质。

最外面的保护层(图 1 中 D 部分),设计直径 $2d = 250 \pm 10 \mu\text{m}$ 。选用折射率略高于外包层的紫外光固化涂料,使外包层中传输光尽快泄漏掉以避免损耗造成的发热。其较高的杨氏模量对光纤起到机械保护作用。外包层与保护层是在预制棒拉丝工艺过程中在线涂覆形成的。

2.2 光纤的制作工艺过程

采用 MCVD 工艺加溶液掺杂法制备掺 Yb^{3+} 光纤预制棒,在通用的拉丝塔上拉制成纤并

在线涂覆聚合物涂层, 构成合理的光波导结构和光纤保护层。工艺过程简述如下:

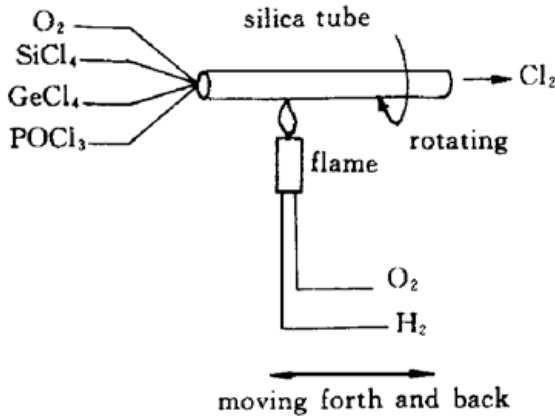


图 2 MCVD 工艺示意图

Fig. 2 Sketch map of the MCVD process

(1) MCVD 工艺制作隔离层和疏松芯层。图 2 是 MCVD 工艺示意图。将石英反应管紧固在玻璃车床上不断旋转, 由高纯 O_2 把液态原料 SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3 等鼓泡载入反应管内, 由氢、氧火焰提供 1800°C 左右高温并沿反应管方向往复运动。进入反应管的原料在高温下氧化反应沉积在管内壁上, 经过若干次沉积后形成一定厚度的沉积层。先按常规工艺沉积隔离层, 然后降低火焰温度到适宜范围去沉积 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 芯层, 未烧结的芯层呈不透明的疏松多孔状。

(2) 溶液掺杂法掺 Yb^{3+} 。将带有疏松芯层的反应管从玻璃车床取下, 浸入预先配制好的 YbCl_3 溶液中至足够时间, 使 Yb^{3+} 均匀地吸附在疏松芯层上。

(3) MCVD 工艺脱水成棒。将反应管重新置于玻璃车床上, 在较低温度下通入高纯 Cl_2 与 O_2 的混合气体进行脱水、干燥。最后在近 2000°C 下烧结芯层, 收缩成透明的光纤预制棒。

(4) 拉制光纤。在拉丝塔上通过 2000°C 以上的高温使棒熔融并拉制成直径符合要求的裸光纤, 在线涂覆并固化外包层和保护层制成成品光纤。

3 掺 Yb^{3+} 双包层光纤性能测试分析

采用标准的测试方法对所制光纤的几何参数和光学传输特性进行测量, 所用测试设备为: 英国 Vickers 公司的 Vickers Fiber Check 几何参数测试仪、美国 P. K. 公司产 FOA-2000 型自动光纤分析系统。光纤的测量数据见表 1 和表 2, 吸收光谱见图 3。从测量数据分析, 光纤的各项技术参数达到了设计指标。内包层直径 $127\ \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.36, 已能满足包层抽运激光实验的要求。975 nm 波长下多模损耗偏高, 主要原因是外包层硅橡胶材料较强的吸收所致。通过选择光学性能更好的材料做外包层能够改善该参数。

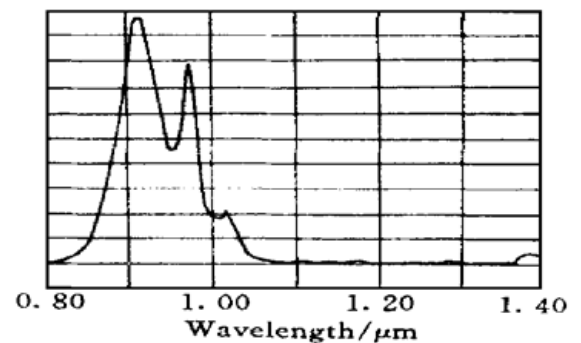


图 3 掺 Yb^{3+} 双包层光纤的吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectrum of Yb^{3+} -doped double-clad fiber

表 1 掺 Yb^{3+} 双包层光纤的几何参数

Table 1 Geometrical parameters of Yb^{3+} -doped double-clad silica fiber

Core diameter / μm	Inner cladding diameter / μm	Outer cladding diameter / μm	Protective coating diameter / μm
5.05	127.0	195.5	251.0

4 掺 Yb^{3+} 双包层光纤的激光特性实验

实验装置如图 4 所示。实验中采用的抽运源是中国科学院半导体所制作的大功率半导体

表 2 掺 Yb³⁺ 双包层光纤的光学特性

Table 2 Optical parameters of Yb³⁺-doped double-clad silica fiber

NA (Core)	NA (Inner clad)	Cutoff wavelength /nm	1.06 μm MFD /μm	1.2 μm background loss/dB · m ⁻¹	975 nm absorption coefficient/dB · m ⁻¹	975 nm multimode loss/dB · m ⁻¹
0.158	0.36	904	5.98	< 0.004	~ 6	~ 0.8

激光二极管,工作波长为 976 nm,输出尾纤为纤芯直径 100 μm 的大芯光纤,最大出纤功率可达 834 mW。使用长度为 10 m 的掺 Yb³⁺ 双包层光纤,直接将光纤与抽运源的尾纤相对耦合。当仅利用光纤的两个端面作为激光腔镜(反射率约 4%)、抽运光功率达最大时,得到了 220 mW 的激光输出,其波长为 1.06 μm。激光阈值功率为 180 mW,光-光转换效率约为 26%。图 5 是激光输出光谱图。实验中发现,在阈值功率以上的激光输出较为稳定。如果在两端加入双色镜或将光纤光栅直接写入光纤中作为前后腔镜,将进一步降低阈值并提高激光输出功率。

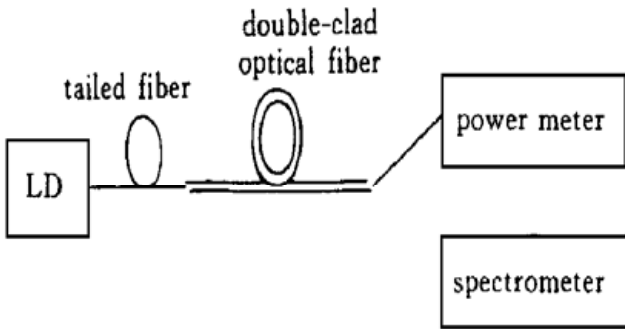


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

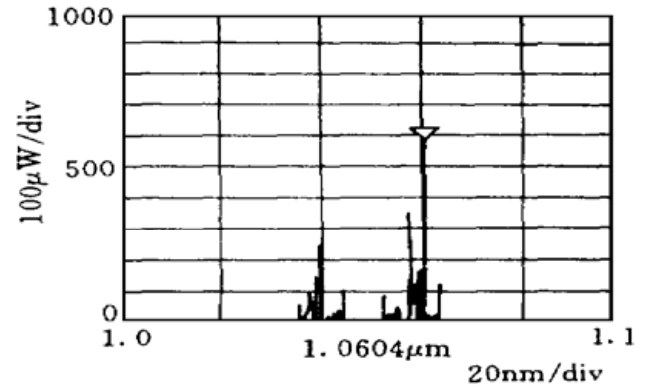


图 5 1.06 μm 激光输出光谱

Fig. 5 Output spectrum of 1.06 μm laser

参 考 文 献

- 1 H. Po, J. D. Cao, B. M. Laliberte *et al.*. High power neodymium-doped single transverse mode fiber laser. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(17): 1500~ 1501
- 2 H. M. Pask, J. L. Archambault, D. C. Hanna *et al.*. Operation of cladding-pumped Yb³⁺-doped silica fibre lasers in 1 μm region. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(11): 863~ 865
- 3 J. Hecht. Fiber lasers prove versatile. *Laser Focus World*, 1998, **34**(7): 73~ 77
- 4 R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7): 1049~ 1056
- 5 V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fibre laser. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14): 1158 ~ 1160

Fabrication and Lasing Properties of Yb³⁺-doped Double-clad Silica Fiber

Ning Ding^{1,2} Wang Wentao¹ Ruan Ling¹ Zhao Jinqi¹ Liu Kun¹ Wu Shaobo¹
Liu Weiwei² Li Yigang² Fu Chengpeng² Lü Kecheng² Dong Xiaoyi²

¹The Electronic 46th Research Institute, Ministry of Information Industry, Tianjin 300220
²Nankai University, Tianjin 300071

Abstract Yb³⁺-doped double-clad silica fiber with large geometry and numerical aperture was developed by using MCVD process and solution-doping technique. The diameter and numerical aperture of inner cladding are 125 μm and 0.36, respectively. The preliminary experiment of the clad-pumped fiber laser has been accomplished. The output power from laser is 220 mW at 1.06 μm , and optical conversion efficiency is 26%.

Key words Yb³⁺-doping, double-clad fiber, cladding pumping, fiber laser

1053 nm 连续单纵模掺 Yb 光纤激光器

惯性约束核聚变(ICF)激光驱动器中使用 1053 nm 激光波长的前端系统,要求前端激光主振荡器输出稳定单纵模激光。光纤激光器可作为 ICF 激光驱动器前端系统中主振荡器的重要选项。我们采用掺 Yb 锗硅石英光纤分布反馈(distributed feedback—DFB)激光器,在 1053 nm 波长附近获得了单纵模激光输出。

实验所用掺 Yb 锗硅石英光纤由武汉邮电科学院提供。光纤掺杂浓度以吸收系数反映,在 915 nm 处的吸收系数约为 36 dB/m。用 196 nm 准分子激光,采用相位掩模法,在该光纤中刻写光栅,制作 DFB 光纤激光器。所刻写光栅长度为 10 cm, Bragg 反射中心波长约 1053.3 nm。进一步通过二次曝光法,在光纤光栅的中心位置产生相移,制得 DFB 相移激光器。

用带尾纤半导体激光器(LD)抽运,其中心波长为 979 nm。当抽运功率约为 10 mW 时,DFB 器件在 1053.3 nm 波长处获得激光输出。目前最大输出约为 100 μW 。采用自由光谱范围 640 MHz 扫描 F-P 干涉仪及示波器观察激光模式,判定输出激光为单纵模。激光器在运行过程中,每经历约 2 min,会出现峰值较小的一相邻纵模,此时,主纵模峰值变小,这一时间约持续 0.5 s,很快又恢复为稳定的单纵模运行。

在此之前,我们利用光纤光栅作腔镜,采用 F-P 腔结构,分别用 0.5 m 及 2 m 掺 Yb 锗硅石英光纤,观察到单纵模激光运行,并获得约 7 mW 的激光连续输出。但此结构单纵模运行的稳定性比 DFB 器件差。进一步提高 DFB 器件单纵模稳定性和激光功率输出水平的工作正在进行中。

致谢 感谢武汉邮电科学研究院提供了掺 Yb 锗硅石英光纤。

高功率激光物理实验室 中国科学院上海光机所 上海 201800

陈兰荣 陈 柏 李学春 范 薇 陈绍和 林尊琪

中国科学院上海光机所 上海 201800

方祖捷 蔡海文 李 玲 夏江珍 赵 玲 梁丽萍

收稿日期: 2000-10-08