

实验十七 LD 泵浦的掺 Yb 双包层光纤激光器

实验序号 No:225045

LD 泵浦掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器实验

Experiment on LD-Pumped Yb³⁺-doped Double-cladding Fiber Laser

一、实验目的

1. 了解掺 Yb³⁺ 光纤的光谱特性
2. 了解双包层光纤的结构和特点
3. 学习 LD 泵浦双包层光纤的技术和方法
4. 掌握使用光谱仪、光功率计测量双包层光纤激光器重要输出参数的测量方法
5. 观测双包层光纤激光器的输出光束模式，与普通光纤的输出光束模式进行比较



二、实验原理

1. 掺 Yb³⁺ 光纤的光谱特性

在石英基质中，Yb³⁺ 离子的能级结构如图 17-1 所示。与其它稀土离子相比，Yb³⁺ 离子的光谱结构更为简单，仅由基态 $^2F_{7/2}$ 和激发态 $^2F_{5/2}$ 两个能级族组成，因此在泵浦波长和信号波长处都不存在激发态吸收 (ESA)。掺 Yb³⁺ 光纤的吸收和发射谱很宽，具有潜在的从 975-1200nm 的发射谱段，Yb³⁺ 的宽带增益弥补了其它激光光源在 1.1—1.2 μm 处的空白。另一方面，很宽的吸收谱使泵浦源的选择具有更多的灵活性，可供选择的激光器有 AlGaAs, InCaAs 半导体激光器、掺钕蓝宝石固体激光器、Nd³⁺:YAG 激光器和 Nd³⁺:YLF 激光器等。

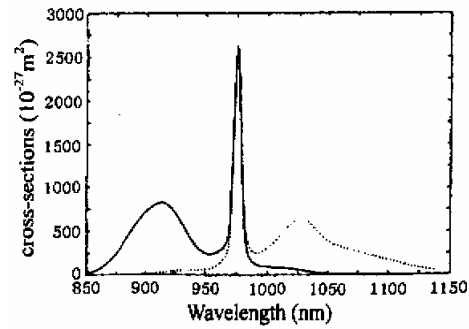
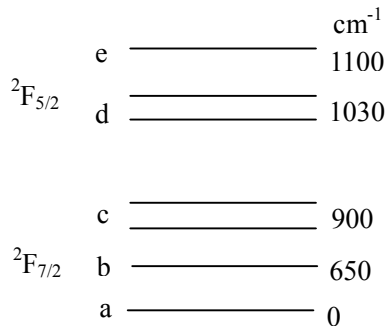


图 17-1 Yb³⁺离子能级结构图 图 17-2 Yb³⁺的吸收（实线）和发射（虚线）截面

2. 双包层光纤结构:

光纤传输理论给出单模传输截止波长为:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a \sqrt{2\Delta}}{2.405} \quad (1)$$

其中, λ_c : 光的波长, a : 纤芯半径, n : 纤芯折射率, Δ : 相对折射率差。对于 $1\mu\text{m}-1.5\mu\text{m}$ 波长而言, 典型的纤芯半径为 $4\mu\text{m}$, 数值孔径仅为 0.23。这一芯径和数值孔径远小于透镜聚焦后高斯光束的模斑半径和汇聚角, 限制了泵浦光的入纤耦合效率。同时, 要获得单模激光输出, 泵浦光也必须是单模, 而单模泵浦光功率是较低的, 因此单模掺杂光纤激光器输出功率通常不超过 100mW。

双包层光纤结构对光纤激光器来说是一个具有重大意义的技术突破。双包层光纤的结构如图 17-3 所示。可以看到, 光纤由 4 个层次组成: (1) 光纤芯; (2) 内包层; (3) 外包层; (4) 保护层。纤芯由掺稀土元素的 SiO_2 构成, 它作为激光振荡的通道, 对相关激光波长设计为单模; 内包层由横向尺寸和数值孔径 (NA) 比纤芯大得多、折射率比纤芯小的纯 SiO_2 构成。它是泵浦光通道, 对泵浦光是多模的; 外包层由折射率比内包层小的软塑材料构成; 最外层则由硬塑材料包围, 构成光纤的保护层。

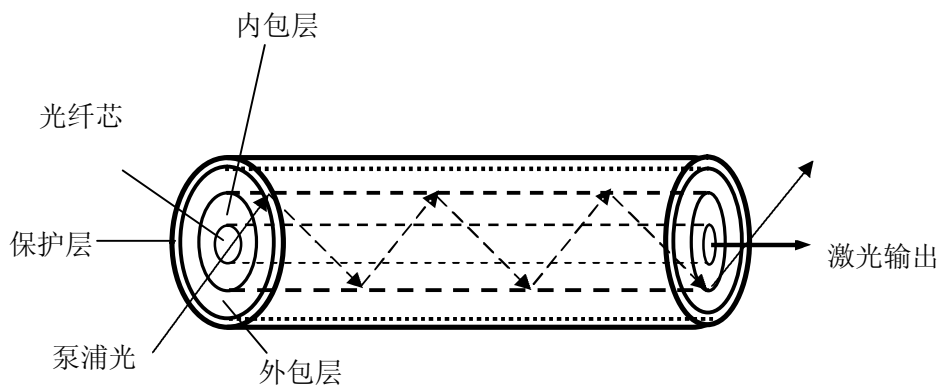


图 17-3 双包层光纤的结构示意图

双包层光纤内包层的关键作用就是提高了光纤的数值孔径：（1）包绕纤芯，将激光辐射限制在光纤纤芯内；（2）多模导管作为泵光的传输通道，把多模泵光转换为单模激光输出。正如图 17-1 所示的，泵光的能量不能直接耦合到光纤纤芯内，而是将泵光耦合到内包层，光在内包层和外包层之间来回反射，多次穿过单模纤芯被其吸收。这种结构的光纤不要求泵光是单模激光，而且可以对光纤的全长度泵浦，因此可选用大功率的多模激光二极管阵列作泵源，将大约 70% 以上的泵浦能量间接地耦合到纤芯内，大大提高了泵浦效率。

双包层光纤的设计应兼顾光的注入效率和泵浦速率的不同要求，前者要求较大尺寸的包层波导，而后者则要求较小尺寸的包层波导。同时泵光吸收效率依赖于内包层的几何形状和纤芯在包层结构中的位置，并且与纤芯/内包层面积成正比。因此圆形、长方形、正方形、六边形、D 形和星形结构的内包层，以及同心、偏心的包层波导都被研究过，其中圆形内包层、同芯的双包层光纤吸收效率最差，而内角为 30° 、 60° 、 90° 和 120° 的多边形的内包层结构为最佳横截面形状。几种典型的内包层结构光纤的截面结构如图 17-4 所示。

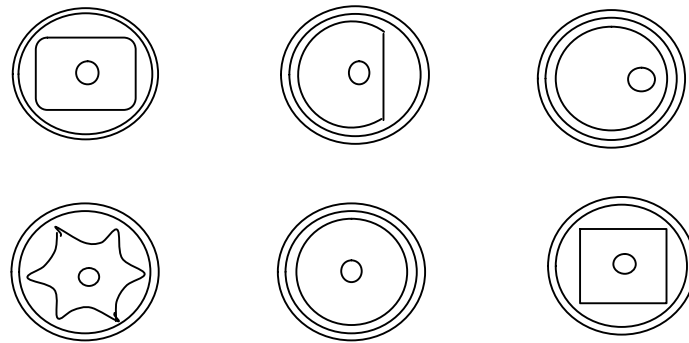
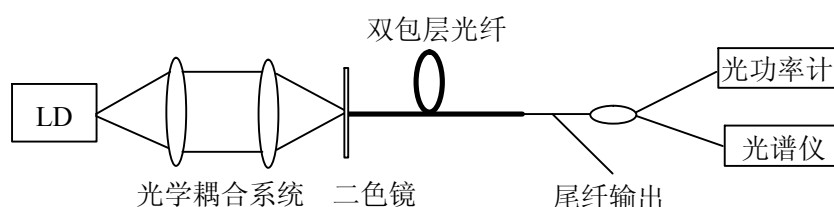


图 17-4 几种典型内包层光纤的横截面结构示意图

3. LD 抽运的掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器：

通常用 LD 泵浦的掺 Yb^{3+} 光纤激光器装置如图 17-5 所示。由两只透镜组成的耦合系统对泵浦光进行准直和聚焦，将一只二色镜紧贴光纤输入端面放置，作为激光谐振腔的前腔镜，利用光纤输出端面的菲涅耳反射作为后腔镜构成激光谐振腔。当然还可以采用其它形式的后腔镜，如利用单模光纤中的背向受激布里渊散射（SBS）提供腔反馈、或者利用半导体可饱和吸收体等。



在图 17-5 所示的激光系统中，由于采用的是端泵浦方式，为提高泵浦光的入纤效率，要求泵浦光入射端的光纤端面有尽可能好的光学质量，同时对作为输出腔镜的光纤端面有更高的要求，包括平整度、高光洁度，并且与光纤的轴线垂直等等。因此，对光纤端面的处理是非常关键的技术。此外，由于 LD 的工作波长随器件温度的变化漂移很大，因此在设计时应考虑使 LD 工作波长的漂移量控制在 Yb^{3+} 吸收峰的半宽度之内。

对于图 17-5 所示的光纤激光器，可以简化为图 17-6 所示的模型来进行理论分析。其中掺 Yb^{3+} 光纤长度为 L ，腔两端反射率分别为 R_1 、 R_2 。腔内前后向传播的信号光功率为：

$$\frac{dP^+(z)}{dz} = \gamma(z)(P_0 + P^+(z)) - \alpha P^+(z) \quad (2a)$$

$$\frac{dP^-(z)}{dz} = -\gamma(z)(P_0 + P^-(z)) + \alpha P^-(z) \quad (2b)$$

其中， $P^+(z)$ 、 $P^-(z)$ 分别为腔内正反方向传输的信号光功率； P_0 为自发辐射功率； α 为信号光的传输损耗； γ 为信号光的增益系数。同时根据边界条件 $P^+(0) = P^-(0)R_1$ 以及 $P^-(L) = P^+(L)R_2$ ，用计算机可以求出方程 (2) 的数值解。从解得的结果可以看出，输出功率与光纤长度、输出镜反射率 R_2 有密切关系。

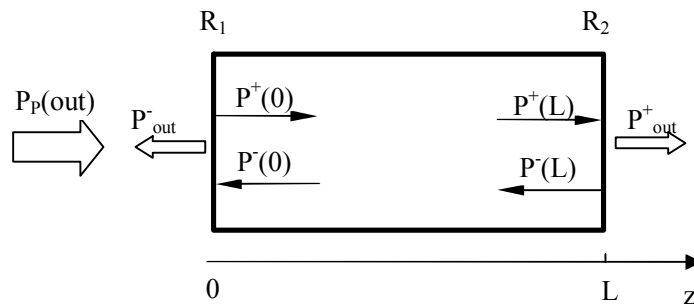


图 17-6 双包层光纤激光器示意图

三、实验装置

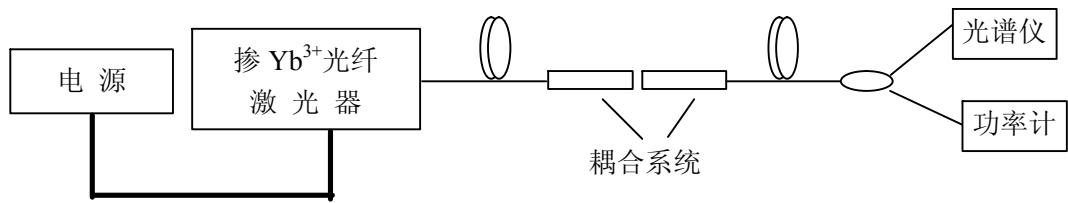


图 17-7 本实验的实验装置图

1. IPG 公司的 PYL 掺 Yb^{3+} 光纤激光器一套 (包括 LD 及泵浦电源, 耦合系统, 掺 Yb^{3+} 光纤, 输出尾纤);
2. Ansitru 公司的 MS9001A 型光谱仪一台;
3. 光功率计一台;
4. Y 型耦合器一只

四

、实验步骤

泵浦功率							
输出功率							
中心波长							
谱线宽度							
中心波长调谐范围:							
阈值泵浦功率:				斜率效率:			

将各连接器件的尾纤输出端用酒精和无纺布擦拭干净;

2. 将 PYL 掺 Yb^{3+} 光纤激光器的尾纤输出通过 Y 型耦合器分别连接到光功率计和光谱仪上;
3. 打开光功率计、光谱仪及 LD 的电源, 进行参数测量: 逐渐增加 LD 的泵浦功率, 直到有激光输出为止, 记录下有激光输出时的泵浦功率阈值。再进一步增加泵浦功率, 记录随泵浦功率增加, 激光器输出功率的变化情况, 计算出斜率效率; 同时记录对应不同的泵浦功率, 激光器输出中心波长、谱线宽度的变化情况; 记录允许的最高输出功率值以及波长的可调谐范围; 并填写好实验数据记录表格。

五、思考题：

1. 为什么圆形结构内包层的双包层光纤吸收效率最差？在实验中可以采用什么方法提高这种光纤的吸收效率？
2. 影响双包层光纤激光器效率的因素有哪些？
3. 如何提高双包层光纤激光器的效率？
4. 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器有哪些重要的应用？