

Er³⁺/Yb³⁺ 掺杂全光纤光放大器

彭江得 岳超瑜 黄翊东 周炳琨

(清华大学电子工程系, 100084)

摘要: 利用单模光纤耦合器和 Er³⁺/Yb³⁺ 掺杂单模光纤研制成全光纤光放大器, 用 Ar⁺ 离子激光(514.5nm)泵浦的8m长器件, 对 1537nm 波长的信号光增益为 15dB。

关键词: 光纤, 掺杂, 放大器

Er³⁺/Yb³⁺-doped all-fiber amplifier

Peng Jiangde, Yue Chaoyu, Huang Yudong, Zhou Bingkun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing)

Abstract: An all-fiber amplifier, is made with monomode fiber couplers and Er³⁺/Yb³⁺-doped monomode optical fiber. For a 8 meter long Er³⁺/Yb³⁺-doped fiber pumped by an argon laser beam (514.5nm), a small signal gain of 0.21dB/mW at 1537nm is obtained.

Key words: fiber, doping, amplifier

Er³⁺ 掺杂光纤光放大器^[1]工作波长与光纤通信第三窗口($\lambda=1540\text{nm}$)相匹配, 是一种高增益、低噪声并有足够大带宽的高效率光放大器。与半导体光放大器相比, 其突出的优点是插入损耗低、增益特性与光波偏振态无关, 且信号间交叉串扰极小, 已在大容量长距光纤通信及多路通信系统中显示出诱人的应用前景^[2]。现今报道的光纤光放大器一般采用分光棱镜^[3]或光纤耦合器^[2]在掺 Er³⁺ 光纤两端将泵浦光与信号光组合注入及分离输出, 难以避免由镜面或焊点引入的附加光损耗与寄生光反馈。

我们新近研制了一种新结构的掺 Er³⁺/Yb³⁺ 全光纤光放大器, 将一段掺杂光纤两端通过专门设计的耦合器与普通单模光纤直接耦合。除了由耦合器引入极低的损耗外, 整个放大器中不存在任何其他的光损耗和光反馈机制。本文报道其设计原理及实验结果。

一、设计原理

全光纤光放大器的工作原理基于掺 Er³⁺/Yb³⁺ 光纤的荧光特性和光纤耦合器的分光特性。

在适当波长的光泵浦下, 掺 Er³⁺/Yb³⁺ 光纤荧光谱带的两个峰值分居 1537nm 和 1553nm 附近, 且前者比后者强得多, 故宜于做成对 1537nm 波长的光放大器。

将一段掺 Er³⁺/Yb³⁺ 光纤的两端分别与两段普通单模光纤做成耦合器(见图1)。当短波长的泵浦光从掺杂光纤 1 端注入耦合器 A 时, 因耦合系数很小, 绝大部分光功率直通到 3 端,

在掺杂光纤中被吸收，并激发其中的 Er³⁺ 离子，形成光增益区。长波长的信号光则从耦合器

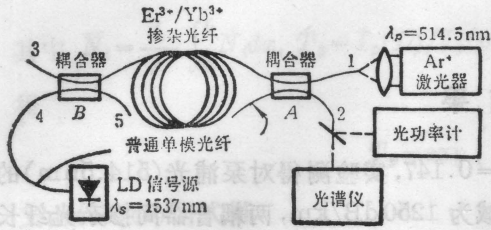


图1 全光纤放大器实验装置

B 的 4 端注入普通光纤，因相应的耦合系数很大，几乎全部进入掺杂光纤，经增益区放大后，又通过耦合器 *A* 的强耦合，从普通光纤 2 端输出。于是，利用耦合器耦合系数的波长依赖关系，便可有效地实现泵浦光与信号光的分离耦合注入和输出。因此，精心设计与制作光纤耦合器是实现全光纤放大器的关键。

实验中采用弧形弯曲光纤对称结构的磨抛拼接型耦合器。根据模耦合理论，从一根光纤耦合到另一根光纤的光功率百分比(即功率耦合比)可表示为^[5]

$$K = \sin^2(OL) \tag{1}$$

式中 *O* 为光纤间距等于弧形光纤耦合器中心光纤间距最小值的平行光纤耦合器的耦合系数，*L* 为总功率耦合比与弧形光纤耦合器相等的等效平行光纤耦合器的作用区长度。

耦合系数 *O* 是波长 λ 的函数，且与两光纤中心轴间距 *h* 有关，在弱导条件下可近似为^[4]

$$O = \frac{\lambda}{2\pi n_1} \frac{u^2}{a^2 V^2} \frac{K_0(vh/a)}{K_1^2(v)} \tag{2}$$

式中 *a* 和 *n*₁ 分别为纤芯半径及折射率，*u* 和 *v* 为归一化横向模参量，*V* 为归一化频率且满足 $V^2 = u^2 + v^2$ ，*K*_{*v*} 为 *v* 阶第二类变态贝塞耳函数。

等效作用长度 *L* 和弧形光纤弯曲半径 *R* 及纤芯半径 *a* 有关，且亦为波长的函数。当弯曲弧度不很大时，可近似为^[4]

$$L \approx (\pi a R / v)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

因 *v* 随波长的增大而减小，故 *L* 随波长的增大而增大。

根据(1)~(3)式，选择合适的光纤间距 *h* 和弯曲半径 *R* 即可控制 *O* 和 *L* 的大小，进而调整耦合器对不同波长光波的耦合比。对于泵浦光，希望耦合比 *K*_{*p*} 尽可能小，以使泵浦光功率径直通过掺杂光纤并被吸收，形成有效的增益区；对于信号光，则要求经耦合器的强耦合，使信号光功率从普通光纤全部注入掺杂光纤，经放大后又从普通光纤输出，即耦合比 *K*_{*s*} 应有较大的值。根据(1)式，耦合器参量设计应满足条件：

对泵浦光： $C_p L_p \approx m\pi$
 对信号光： $C_s L_s \approx (2m+1) \frac{\pi}{2}$ ($m=0, 1, 2, \dots$)

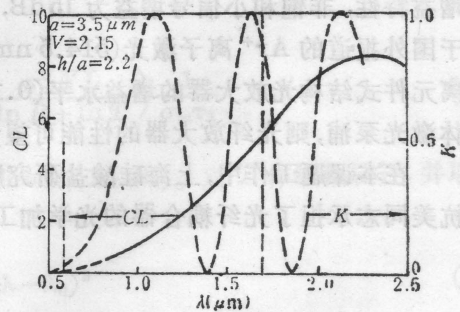


图2 *CL* 和 *K* 与 λ 的关系曲线

以本文报道的 Er³⁺/Yb³⁺ 全光纤放大器为例，纤芯半径 *a* = 3.5 μm，耦合器光纤弯曲半径 *R* = 50 cm，我们掌握的磨抛工艺已能精确控制光纤磨抛面距纤芯仅 0.2~0.5 μm，取 *h/a* = 2.2。根据(1)~(3)式计算的乘积 *CL* 和耦合比 *K* 与波长 λ 的关系如图 2 所示。对于泵浦光(514.5 nm)， $C_p L_p \approx 0.142$ ，即 $K_p \approx 0.02$ ，可见泵浦光功率仅损耗 2%；对于信号光(1537 nm)， $C_s L_s \approx 4.9$ ，得 $K_s \approx 0.96$ 。适当调整耦合器两光纤间的相对位置(即改变 *h*)，即可使 *K*_{*s*}

$=1$, 信号光几乎无损耗地全部耦合进增益区。从图 2 不难看出, 对于短波长的泵浦光, 其耦合比 K , 随耦合器的调整不会有太大改变。

二、实验结果

国产 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂单模光纤数值孔径 $N.A=0.147$, 实验测得对泵浦光(514.5nm)的吸收损耗为 1500 dB/km, 对信号光(1537 nm)的衰减为 1250 dB/km, 两耦合器间掺杂光纤长度为 8 m。

实验装置如图 1 所示, 功率为 200 mW 的 Ar^{+} 离子激光从 1 端经聚焦注入, 测得进入增益区的泵浦光功率为 85 mW。从 3 端输出 5 mW。在 3 端用光谱仪(AQ1417B)观测的荧光谱示于图 3, 可以清楚地看到在 1537.2nm 和 1553.4nm 处分别出现两个大小不同的峰值。

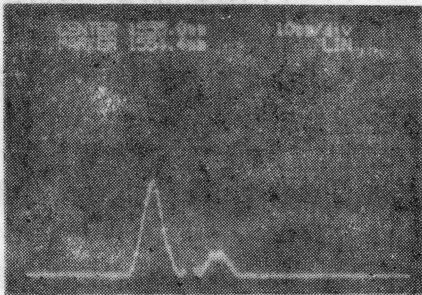


图 3 掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 光纤荧光谱

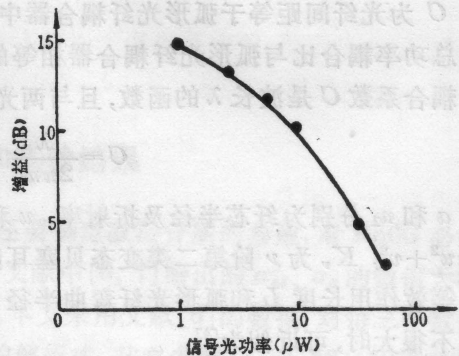


图 4 掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 全光纤光放大器增益特性

实验中采用波长 1537 nm 的 InGaAsP 激光二极管作为信号光源, 从普通光纤 4 端注入, 用光功率计(Photodyne 33XLA)监测从 2 端输出的信号光功率。图 4 给出实验测得的放大器增益特性, 非饱和小信号增益为 15 dB, 相应的单位泵浦功率产生的增益为 0.19 dB/mW, 优于国外报道的 Ar^{+} 离子激光(514.5 nm)泵浦、相同数值孔径($N.A=0.14$)掺 Er^{3+} 光纤、分离元件式结构光放大器的增益水平(0.16 dB/mW)^[5]。如采用最佳泵浦波长 980 nm 的半导体激光泵浦, 则光纤放大器的性能可望大幅度提高, 并达到实用水平。

在本课题工作中, 上海硅酸盐研究所吴方东等同志提供了掺 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 光纤, 清华大学陈抗美同志承担了光纤耦合器的光学加工, 作者谨向他们致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 R. J. Mears *et al.*, *Electr. Lett.*, **23**, 1026 (1987)
- 2 Noboru Edagawa *et al.*, ECOC'89, PDA-8
- 3 K. Aida *et al.*, ECOC'89, PDA-7
- 4 M. J. I. Digonn *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-18**, 746 (1982)
- 5 R. I. Laming *et al.*, ECOC'88, p. 25~27