

# EDFA 工作原理的分析及其在光通信中的应用

申杰奋<sup>1</sup>, 刘要北<sup>2</sup>

(1. 新乡医学院 生命科学技术系, 河南 新乡 453003; 2. 河南科技学院 机电学院, 河南 新乡 453003)

**摘要:**介绍了掺铒光纤放大器的工作原理和它在光通信中的应用,重点分析了 EDFA 适合在 1.54 $\mu\text{m}$  处的光信号放大,并展望了 EDFA 的发展前景。

**关键词:**掺铒光纤放大器; 光纤通信; 泵浦源

**中图分类号:** O411.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-3325(2007)01-0082-02

**作者简介:** 申杰奋(1978-),女,河南安阳人,硕士,助教。研究方向:电子与光通信。

在传统的光纤通信系统中,光信号在光纤中传输时,不可避免的存在着一定的损耗和色散,损耗导致光信号能量的降低,色散导致光脉冲展宽,因此,每隔一段距离就需要设置一个中继器,以便对信号进行放大和再生中继续传输。解决这一问题的常规方法是采用光—电—光中继器,这种光—电—光的变换和处理方式在一定程度上已满足不了现代传输的要求。光放大器的出现改变了这种状况,特别是 1989 年诞生的掺铒光纤放大器代表的光放大器技术是光纤通信技术上的一个革命。它可以使对光信号的放大和再生中继不再经过光—电转换。特别是掺铒光纤放大器使信号光在光纤中直接得到增强和放大,这使得通信成本降低,设备简化,运行维护方便。随着掺铒光纤放大器的实用化,愈来愈多的用在数字光纤传输系统中,它给原来的数字光纤传输系统带来了新的发展。

掺铒光纤放大器的成熟使 WDM 技术迅速进入实用阶段。EDFA 有数十到上百纳米的增益带宽,一个 EDFA 放大器就可以代替许多设备实现对 WDM 系统的多信道光信号同时进行放大,使得成本大大下降。更重要的是,波分复用技术和 EDFA 可以直接在原来已经大量铺设的 G.652 光纤网上直接使用,实现了光纤通信容量的平滑升级。现在 WDM + EDFA 已经成了高速光纤通信网发展的主流,因此,首先简述 EDFA 的工作原理,并对其进行了分析,也对其发展前景做了展望。

## 一、EDFA 的工作原理

掺铒光纤放大器是将掺铒光纤在泵浦源的作用下形成的光纤放大器。早在 1964 年人们就开始研究光纤放大器。随着低损耗稀土掺杂光纤工作特性和制造技术的不断发展,直到 1986 年才开始实际使用。掺铒光纤放大器的工作波长为 1.54 $\mu\text{m}$ ,用 Ar 粒子激光器作泵浦源,在 3m 长的光纤中可以得到 3.28dB 的增益。用掺铒光纤放大器放大,当时光纤

通信的 1.5 $\mu\text{m}$  的工作波长,引起了全世界的兴趣。现在 EDFA 已用于光纤通信和光纤有线电视网,为光纤通信的更新换代开辟了新途径。

铒的原子序数为 68,原子量 167.2,价电子 3,属镧系元素。在制造光纤时掺入一定量的三价铒离子  $\text{Er}^{3+}$ ,就可以形成掺铒光纤。由于掺铒离子分散基质之中,它属于分立能级。但由于光纤基质结构产生的本地场的影响,对铒离子产生微扰,使其谱线分开,这就是斯塔克效应。在这些分裂态之间的能级差与能级之间的能量差相比很小,就形成了准能带。如图 1 所示,图中左边的  $4I_{11/2}$  是通过量子力学解出的原子核外电子能级, $4I_{15/2}$  是  $\text{Er}^{3+}$  的基态(各能级的间隔和由于微扰而产生的斯塔克效应展宽的能带宽度属于量子力学结果)。右边 980nm 表示在该能级上的电子跃迁到基态发出的光波长。

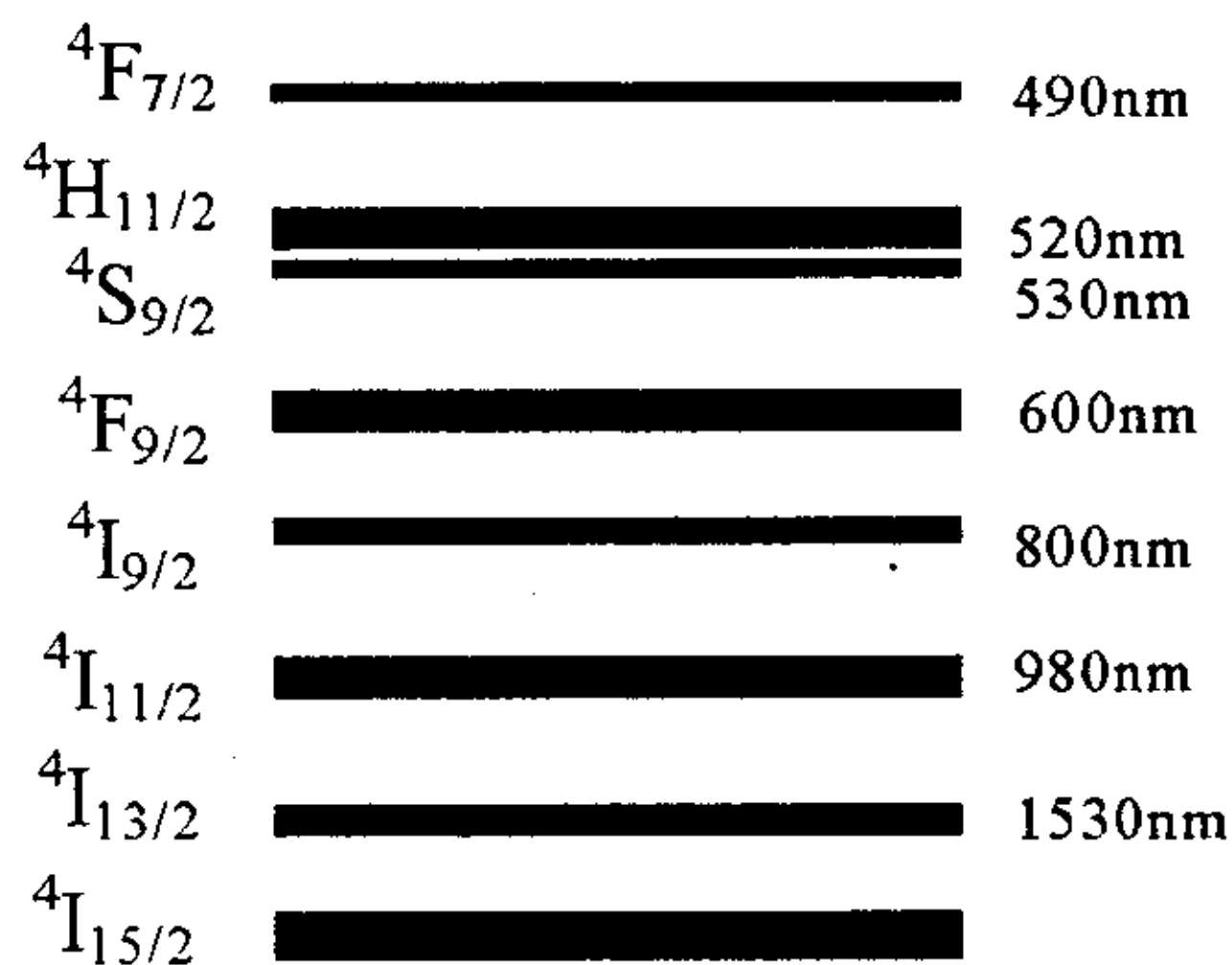


图 1 在光纤铒离子的能带图

参与激光放大过程的只有三个能带(见图 2),E1 相应于  $4I_{15/2}$ ,为基态,E2 相应于  $4I_{13/2}$ ,为受激辐射的高能级。受激辐射跃迁所产生的光子波长为  $\lambda = hc/(E_2 - E_1) = 1520 \sim 1570\text{nm}$ 。这就是能够放大的信号光波长范围。E3 是泵浦的

高能级。泵浦光的泵浦作用发生在 E3 与 E1 之间,泵浦频率为  $f = (E3 - E1)/h$ ,可以选择不同的能级作为 E3。

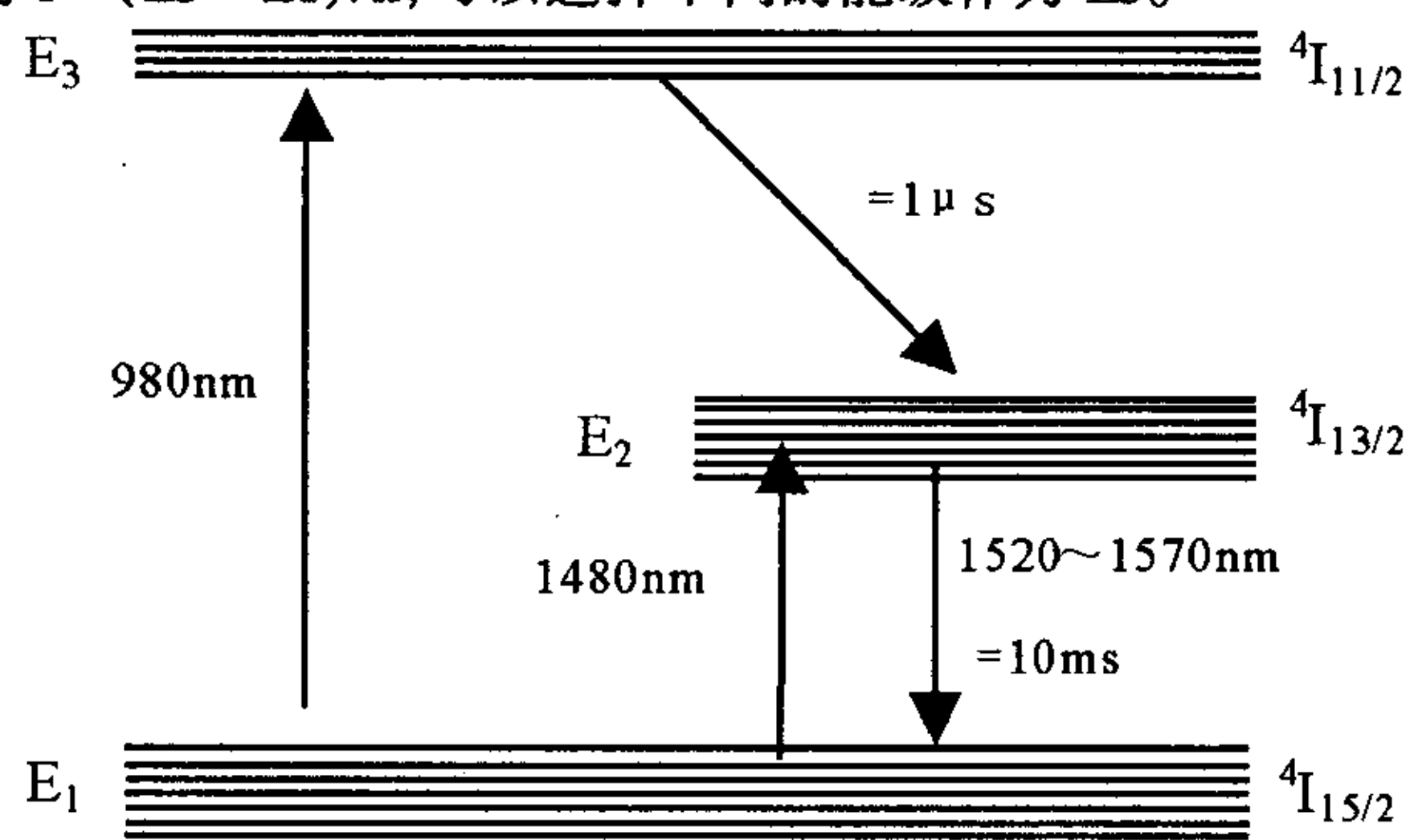


图2 EDFA 的工作原理

在外界泵浦源的作用下,基态  $4I_{15/2}$  上的粒子吸收泵浦源的能量而跃迁到 E3 能级上。E3 能级上的电子主要通过无辐射跃迁的形式,迅速转移到 E2 能级上,E3 能级最好能有较大的宽度,以充分利用宽带泵浦源的能量来提高泵浦效率。在图 2 中的  $\tau$  表示该能级的寿命,E3 能级的寿命很短,而 E2 能级的寿命较长,大于 10ms,属于亚稳态能级,容易积聚电子。当泵浦源足够强时,便在 E2 能级上聚集起足够的粒子,在 E2 和 E1 能级之间形成粒子数反转分布,这时便对信号具有放大作用。

## 二、原理分析

从图 1 右边的 nm 数可以看出,钇离子存在许多能级,这些高能级(由于斯坦克效应,这些能级其实是能带)原理上都可以作为 E3 能级,都可以用来泵浦 EDFA。在这些频带中选用泵浦波长的原则是要求泵浦效率高,当然还必须要有相应波长的大功率激光器作泵浦源。0.65nm,0.80nm 都利用过,但是这些激光器都是氩离子激光器、Nd·YAG 激光器。这些方案都存在泵浦效率低和泵浦源体积大的问题,不适合在光纤通信中应用。

泵浦效率  $\eta_p$  可以用来衡量泵浦的有效性,其表达式如下:

$$\eta_p = \text{放大器增益(dB)} / \text{泵浦功率(mW)}$$

不同吸收频率处的泵浦效率相差很大,实验测得的一组数据是:

波长 $\mu\text{m}$	效率 dB/mW
0.532	1.35
0.8	0.8
0.98	4.9
1.483.9	

选用泵浦频带的另一个重要因素是无激发态吸收。在理想的系统中,处于激发态的电子,在受到外来的光子作用时,向低能级跃迁而发出光子,但是还有一种可能就是它可以吸收外来的光子继续向更高的能级跃迁,这就是激发态吸收(Excited State Absorption, ESA)。很明显,如果电子处在激发吸收带时,它可以继续吸收泵浦光子或信号光而向更高能级跃迁,这样就降低了泵浦效率,并引起信号光衰减,因而泵浦源应选在无激发吸收的频带,0.98 $\mu\text{m}$ 、1.48 $\mu\text{m}$  泵浦对应着无激发态吸收的能带,因而是备受重视的两个波长。泵浦源都可以用半导体激光器来实现。

0.98 $\mu\text{m}$  与 1.48 $\mu\text{m}$  相比,增益高、泵浦效率高、噪声小,具有很大的吸引力,是目前光纤放大器的首选波长。1.48 $\mu\text{m}$  的优点:它和信号光的波长接近,因而 1.55 $\mu\text{m}$  的单模光纤对信号光和泵浦光都是单模传输,可用单模光纤制成定向耦合器,将信号光和泵浦光低损耗导入光纤。因此在低掺钇光纤放大器中,应用这一段的泵浦更为有利,因而得到了广泛的开发、研究和应用。

## 三、EDFA 的应用

掺钇光纤放大器在密集波分复用系统中的应用,主要是补偿传输中的光纤损耗,根据放大器在系统中的位置及作用,可以分成以下 3 种类型:

### (一)EDFA 用作前置放大器

EDFA 其低噪声的特性,适合用作接收机的前置放大器。接收机的灵敏度可提高 10~20dB。当光信号进入接收机前,使它得到放大,以抑制接收机内的噪声。

### (二)EDFA 用作功率放大器

将 EDFA 直接放在光发射机制后来提升输出功率,可将通信距离延长 10~20km。

### (三)EDFA 用作线路放大器

EDFA 用作线路放大器使它在光纤通信系统的一个重要应用。用 EDFA 实现全光中继代替原来的光—电—光中继,这种方式非常适合在海底光缆应用。但其最大的应用是在 WDM 系统中。

只要有一个 EDFA 就可以放大全部的光信号。但要求所有的信号光在 EDFA 的平坦增益带宽内。总之,EDFA 的应用,实现了直接光放大,它具有增益高、带宽宽、噪声低、增益特性对光偏振状态不敏感、对数据速率以及格式透明且在多路系统中信道交叉串扰可忽略等优点,是光电光放大技术所不可比拟的。尤其 EDFA 在密集波分复用(DWDM)传输系统中的应用大大增加了光纤的传输信息容量,使 EDFA 成为光放大器的主流。而且应用 EDFA 的光缆有线电视传输系统已与 1993 年投入使用,在这种系统中,光的节点数、传输距离和光纤中光信号密切相关,EDFA 可以扩大网径和用户数,目前在我国已经大量采用 EDFA 的光纤 CATV 网。

EDFA 应用范围非常广泛,发展前景也非常广阔。随着全光网络和光互联网的发展,对 EDFA 的技术要求会越来越高。

## 参考文献:

- [1] 邱琪,邓海平,刘浩然. 宽带增益平坦掺钇光纤放大器的应用学位论文[D]. 电子科技大学,2004.
- [2] 原荣. 光纤通信技术讲座(九):光复用技术[J]. 光通信技术,2003(9).
- [3] 彭勇,曹望和. 掺钇光纤放大器在光通信中的应用[J]. 应用光学,2003(1).
- [4] 邓大鹏. 光纤通信原理[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [5] C J Koester, E Snitzer. Amplification in a fiber Laser[J]. Applied Optics, 1964,3(10):1182-1184.

【责任编辑 郭涛】