

# EDFA光纤放大器原理及应用(3)



丁 炜 济南历泰信息科技有限公司

## 第三部分 EDFA 的性能指标

EDFA 的主要应用特性包括增益特性、输入输出特性、饱和特性、增益带宽特性和噪声特性等,它们与输入光功率大小、掺铒光纤长度及参数、泵浦功率大小及泵浦波长、信号波长等都有密切关系,本文将分别介绍之。

### 1 EDFA 的增益特性

增益特性表示了光放大器的放大能力,是 EDFA 光纤放大器的第一要求。在掺铒光纤放大器中,增益  $G$  定义为光放大器输出信号光功率  $P_o$  对输入信号光功率  $P_i$  的比值,即  $G=10\lg(P_o/P_i)$ 。EDFA 的增益大小与多种因素有关,通常为 15~40dB。图 1 表示增益与光纤中掺铒浓度的关系。

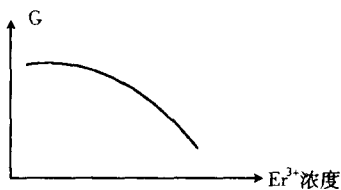


图 1

从图中可以看出,当  $Er^{3+}$  的浓度超过一定值时,增益反而下降,其原因是  $Er^{3+}$  过量会产生聚合,引起浓度消光现象,因此在掺铒光纤的制作过程中,要控制好铒的掺入量。

信号增益除与  $Er^{3+}$  浓度有关外,还与泵浦光功率密切相关,下图表示了信号增益与泵浦光功率之间的关系。

小信号输入时的增益系数大于大信号输入时的

增益系数。通常都定义增益为零时的泵浦光功率为泵浦阈值功率  $P_{th}$ , 阈值功率表示为  $P_{th}=A h P_p / B\tau$ , 式中: $A$  为有效相互作用面积, $h$  为普朗克常数, $P_p$  为泵浦光功率, $B$  为峰值泵浦吸收横截面, $\tau$  为荧光寿命(10~14ms)。  $P_{th}$  值一般为 5mW,当  $P_p=P_{th}$  时,净增益为零,然后随着  $P_p$  的进一步增加, $G$  逐渐增大,在开始一段  $G$  增长较快,并与  $P_p$  成正比,然后特性进入饱和区, $G$  增长变慢。当泵浦光功率  $P_p$  满足  $P_p/P_{th}$  大于 3 时,放大器增益出现饱和,即泵浦功率增加很多,而增益基本保持不变,此时放大器的增益效率(图 2 中曲线的斜率)随着泵浦功率的增加而下降。

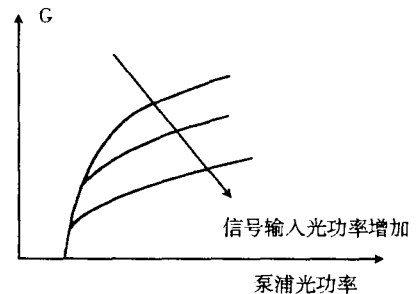


图 2

增益与光纤长度也有关系。由增益与光纤长度的关系曲线可以看出,开始时增益随掺铒光纤长度的增加而上升,但当光纤超过一定长度后,增益反而逐渐下降,因此存在一个最佳增益的最佳长度,但应注意,这一长度只能是最大增益长度,而不是掺铒光纤的最佳长度,因为还涉及到其它特性(如:噪声特性等)。

掺铒光纤放大器实用性的关键是在半导体激光器能提供的光功率下得到高增益,衡量这一性能的参

数是增益系数——放大器最高增益与其对应泵浦光功率的比值,它指出放大器的泵浦效率。目前泵浦激光器的工作波长主要有两种:980nm 和 1480nm,其最高增益效率可分别达到 11dB/mW 和 6.5dB/mW。

## 2 EDFA 的输出功率特性

输出功率是光放大器的第二个重要的特性,它代表了一个阈值,在这一阈值点放大器从线性增益变化到非线性区。理想的 EDFA 光放大器,不管输入功率有多高,光信号都能按同一比例被放大,但实际上 EDFA 却并非如此,当输入功率增加时受激辐射加快,以致于减少了粒子反转数,使受激辐射光减弱,导致增益饱和,输出功率趋于平稳(近似于固定功率输出)。EDFA 的最大输出功率常用 3dB 饱和输出功率来表示,意思是当饱和增益下降 3dB 时所对应的输出功率,该参数很重要,它代表了 EDFA 的最大输出能力。

EDFA 的饱和输出特性与泵浦功率大小、掺铒光纤长短有关。泵浦光功率越大,3dB 饱和输出功率越大;光纤长度越长,3dB 饱和输出功率也越大。在这里需要区分的一点是饱和的输出功率,其不同于饱和输出功率,饱和的输出功率是指放大器所能达到的最大功率,当在高饱和状态下,泵浦与信号达到完全的能量转换时,最大输出功率可以同输入泵浦功率相等。

## 3 EDFA 增益与输入、输出功率的关系

EDFA 的增益和输出功率水平是光放大器的关键指标,两者都与输入功率和放大器的特性有关。输入功率是光放大的起点。与在电子系统中一样,输入功率必须高于一个最小值,但同时要低于一个最大值才能使光放正常工作,输入信号还要远高于背景噪声,以提供足够高的信噪比。由于光放大器是模拟器件,它会放大与信号一起进入它的任何噪声,过高的输入功率会造成光放饱和,尽管它不会“烧断”光放大器的掺铒光纤,但就像超过额定功率的音频扬声器那样,结果不言而喻。增益和输出功率取决于输入功率和光放大器的特性。增益是用 dB 作单位的放大倍数,它是输入功率和放大器设计参数的函数。对小输入信号来说,增益最大,在较高的输入功率下,增益有可能饱和,这是因为光放大器开始消耗通过受激辐射放大信号的受激铒原子;输出功率不会停止增长,因为光放大器不会真正用掉最后一个受激铒原子,而是每次

增加的光子发生受激辐射的可能性越来越小,这样被放大的可能性也变小,这意味着增益随输入功率的增加而减小。增加输入功率可以使输出功率持续增大,但即使少量增加输入功率,对输出功率的提升也不像在更低功率水平下的那样大。典型的光放大器的小信号增益是 30dB,但在更高功率下的增益会降低到 10dB 左右。小信号输入时增益最高,高功率输入时会发生增益饱和。输出功率是指光纤放大器出射的放大信号的总功率,以 mW 或 dBm 量度,如以 dBm 量度功率则输出功率等于输入功率加上增益(用 G 表示),即  $P_{out} = P_{in} + G$ 。最大功率受泵浦功率和放大器构造的限制,典型的最大饱和输出功率为 10~24dBm,对于单波长系统,它是发送的光信道中的功率,对于 WDM 系统,它是所有被放大的光信道的信号功率之和,这意味着每个信道的功率随信道数的增加而减少,若最大功率是 100mW,光放大器能将这 100mW 发送到每一个光信道:以每信道 12.5mW 发送到 8 个信道或者以每信道 2.5mW 发送 40 个光信道。

## 4 EDFA 的增益带宽特性

作为实用的光放大器,总希望在宽的频带内获得高的增益,即:有大的增益带宽,大的增益带宽对于各路宽带信号的复用放大,PS 与 FS 级超短光脉冲的放大都是至关重要的。EDFA 的增益带宽与许多因素有关,如掺铒光纤的基质材料、泵浦波长、光纤长度的使用特性等。

从 EDFA 的 ASE 谱及波长增益特性看,其增益谱是相当宽的,如 Al/Ge/Si 光纤可达 35nm。但它的形成不规则,在小信号条件下,在 1530nm 附近有个增益尖峰,3dB 谱宽约为 5nm;在 1550nm 附近的增益较低,但相对较平坦,3dB 谱宽约 15~20nm。在饱和条件下,1530nm 尖峰下降较多,甚至低于 1550nm 峰。

在多路信号复用放大时,为了容纳较多的信道,且各信道都能得到较均匀的放大,希望放大器的增益谱较为平坦,即要求被放大的各个信道信号输出具有几乎相等的增益平坦度。在通常的情况下,光放大器在 1.55 波段的带宽为 30~40nm,将它用于 DWDM 系统时,因各信道的波长不同而有增益偏差,经过多级放大后,增益偏差累积,低电平信道信号的 SNR 恶化,高电平信道信号也因光纤非线性效应而使信号特性恶化,最终造成整个系统不能工作。因此,要使各个信道的增益偏差处在允许范围内,放大器的增益必须平坦。通过小心地选择  $\lambda_p$ 、 $P_p$  和 L,可以获得宽平的

增益谱,利用光滤波器进行增益谱整形是一种外部的解决方法。目前已经得到  $G$  大于 25dB 时,3dB 带宽大于 30nm,这时  $P_p < 50\text{mW}$ 。

## 5 EDFA 的噪声特性

EDFA 的输出光中,除了有信号光外,还有自发辐射光,它们被一起放大,形成了影响信号光的噪声源,EDFA 的噪声主要有以下四种:(1)信号光的散粒噪声;(2)被放大的自发辐射;(3)ASE 光谱与信号光之间的差拍噪声,这里的差拍噪声指的是信号和 ASE 经光电检测器输出的光生电流表达式中的交叉项;(4)ASE 光谱间的差拍噪声,这里差拍噪声指的是 ASE 的二次项。

以上四种噪声中,后二种影响最大,尤其是第三种噪声是决定 EDFA 性能的重要因素。衡量 EDFA 噪声特性可用噪声指数  $NF$  来度量。其定义为 EDFA 的输入信噪比与输出信噪比的比值,它与输入信号功率、泵浦光功率、泵浦方式紧密相关。(1)在输入小信号情况下,光放的噪声指数( $NF$ )随着输入信号光功率的增大而略有减小,这是由于受激辐射转换为信号光子的反转离子数随信号光功率的增大而增多,与之对应供自发辐射放大的反转离子数相对减小;在小信号增益保持恒定时,ASE 功率的减小将导致噪声系数的减小,当 EDFA 进入饱和和工作状态后,尽管放大过程对 ASE 的抑制增强,但是由于饱和增益下降得较快,以至噪声指数反而随信号功率的增大而增大。(2)噪声指数随着泵浦功率的增加而减小,EDFA 的噪声功率由两部分组成。一部分是每一小段光纤产生的自发辐射,而大部分是该段光纤对前部光纤产生的自发辐射的放大,即放大的自发辐射。泵浦功率越大,前一部分所占的比重就越小,这是因为虽然输出噪声功率随泵浦功率的增大而增大,但是信号同样也获得增益,因而每一段光纤产生的自发辐射的比重较小,所以总的信噪比提高,即噪声指数  $NF$  降低。(3)EDFA 的常见泵浦方式有三种:同向泵浦、反向泵浦和双向泵浦,在掺铒光纤(EDF)较短时,这三种方式的 EDFA 小信号增益和噪声指数相差不多,但是由于这三种泵浦方式都能使整个光纤的铒离子处于完全反转的状态,所以信噪比恶化基本相同,但是当 EDF 长度增大时,同向泵浦形式输出的 ASE 功率最小,因而噪声指数最低;双向泵浦形式的噪声指数居中;反向泵浦形式的噪声指数最高。不同的泵浦方式,存在着不同的 EDF 长度,使 EDFA 的性能达到最佳。理论与实践已

经证明,对于任何利用受激辐射进行放大的光放大器,其噪声系数的最小值为 3dB,这个极限就被称为噪声系统的量子极限。对于 980nm 泵浦,其噪声指数可以基本达到该极限,数值约为 3.2~3.4dB,而 1480 泵浦的最小噪声指数约为 4dB。

光放大器的噪声会造成系统性能的劣化,因此对噪声的优化设计是必须的。对 EDFA 噪声优化的目的,即在满足所需指标的前提下尽可能降低噪声指数或作某种权衡调整。波导结构的变化(包括 NA、掺杂半径等)对噪声指数的影响非常小,但泵浦功率升高时,噪声指数下降。值得注意的是,在大信号功率时,1550nm 波长的噪声指数要比 1532nm 波长低 1~2dB。光放大器噪声的优化可通过在放大器中间插入波长选择元件和方向选择元件来完成。在 EDFA 中插入光隔离器,可有效地去除 ASE 噪声,使光纤输入端的粒子数反转程度上升,噪声系数降低。

另一个改善增益和噪声性能的元件是波长选择滤波器,它滤去信号通带之外的 ASE 功率,导致放大器性能的巨大改变。实验表明,当泵浦功率在 5mW 到 100mW 范围内变化、光滤波器带宽为 1nm、信号波长为 1554nm 时,滤波器的插入对 1554nm 信号波长放大器性能所造成的改善大于 1534nm 信号波长,增益可改善达 12dB(980nm 泵浦)和 8dB(1480nm 泵浦),而噪声指数则降低 4dB(980nm 泵浦)和 1dB(1480nm 泵浦)。加入光滤波器的另一个作用是进行光放大器的增益均衡,此时所用的滤波器为带阻型,带阻峰值对准光放大器的增益峰值。由于带阻滤波器限制了增益峰值处的信号功率和 ASE 功率,保存了亚稳态能级上的粒子,从而使长波长的信号增益增加了,此消彼长,于是整个增益谱变得平坦一些。

## 6 EDFA 的失真特性

引起 EDFA 的失真主要有两个来源:一是 EDFA 中受激辐射输出的光功率与人射信号光功率之间的非线性造成的失真,二是光放增益谱的不平坦所引起的失真。因为第一个原因造成的失真远低于光发射机本身的失真,可以忽略不计,故在 EDFA 中只考虑第二个原因造成的失真。EDFA 的失真同输入光功率和信号波长有关。在入射的信号光功率一定时,可以找到一个最佳波长,使二次互调失真不存在。反过来,在波长一定时改变信号光功率,对有的波长(例如 1.555 $\mu\text{m}$ 、1.560 $\mu\text{m}$ ),可以找到一个人射光功率,使二次互调失真不存在,但对有的波长(例如 1.545 $\mu\text{m}$  和

1.550 $\mu\text{m}$ ),二次互调失真却与入射信号光功率无关。EDFA的输入光功率和信号波长之间有一个最佳组合,当采用合适的输入光功率时,可以做到EDFA无失真的工作。这时光纤有线电视系统的失真与EDFA无关,可以顺利级连光纤放大器而不使失真恶化,大大增加了系统的可扩展性。

EDFA的输出失真是光发射机失真和EDFA增益倾斜引起失真的矢量和,两个失真的位相差与输入信号光功率有关,输入信号光功率的不同使他们的叠加有时加强、有时减弱。光发射机激光器产生的CSO和EDFA的输入信号光功率无关;而EDFA增益倾斜引起的CSO失真,在输入光功率小于6dBm时随功率的增加而减少,在输入光功率大于6dBm时随功率的增加而增加,在输入光功率等于6dBm时增益倾斜引起的失真为零,用dB表示为负无穷大。激光器产生的失真与增益倾斜引起的失真之和的相位差,在输入光功率小于6dBm时为180°,二者互相抵消;在输入光功率大于6dBm时为零,二者互相加强。激光器产生的失真与增益倾斜引起的失真叠加的结果,在输入光功率为-1.3dBm时,取极小值(-74dB)。

## 7 EDFA噪声系数对光传输系统 CNR的影响

如果保证在有光纤放大器和没有光纤放大器时进入光接收机的信号光功率相等,并且在无EDFA时的CNR及光调制度 $m$ 一定的前提下,光纤放大器的噪声系数越低,同时其输入光功率越大,则系统载噪比损失越小。由于噪声系数与输入光功率有关,所以对于选定的EDFA光纤放大器,系统载噪比实质上取决于输入EDFA的信号光功率的大小。实验证明,当光纤放大器的输入功率为+6dBm时,EDFA所引起的系统载噪比的损失只有约1dB,因此在含有EDFA的模拟光纤传输系统中,为确保系统的载噪比,光纤放大器的输入光功率应取得较大。在优化设计的情况下,一个光纤放大器的引入可使传输距离得以延长,而系统载噪比也只降低1~1.5dB,而光纤不太长时,CSO、CTB几乎不变,这样就允许几次光放大,比光-电-光中继式(中继一次载噪比降低3dB、CSO劣化4.5dB、CTB劣化6dB)优越得多。

在含有EDFA的链路中,系统载噪比与光接收机输入光功率的关系值得注意。光纤放大器噪声和激光器相对强度噪声分别决定的载噪比与接收光功率无

关,但由接收机电路噪声决定的载噪比与接收光功率的平方成正比,由光电转换散弹噪声决定的载噪比与接收光功率也成正比。

从上面的介绍可知,影响EDFA性能的因素很多,有设计方面的,如铒光纤参量、泵浦方式、波长等;也有使用方面的,如信号波长、输入信号光功率等,但影响EDFA性能的主要因素是铒光纤参量与泵浦波长,下面将作简要总结。(1)铒光纤参量的影响,铒光纤参量包括它的材料特性和波导特性。光纤基质材料特性影响EDFA的增益系数、带宽、可掺 $\text{Er}^{3+}$ 浓度、泵功率到信号功率的转换效率等许多参量。为了与普通单模光纤相兼容,容易连接,铒光纤的基质材料用得最多的是Ge/Si和Al/Ge/Si型两种,其中Ge/Si光纤具有较高的增益系数,而Al/Ge/Si光纤的增益带宽较宽(可达35nm以上),且易于将 $\text{Er}^{3+}$ 控制在纤芯的中心区,以改进泵浦效率。 $\text{Er}^{3+}$ 浓度影响EDFA的增益系数和最佳光纤长度。早期的EDFA采用高掺杂浓度(1000ppm左右)和短(几到十几米)的铒光纤,近来研究及产品应用表明低掺杂浓度(100ppm左右)、长(几十到几百米)的铒光纤有更好的性能。目前商用化的EDFA都采用后者。EDFA的波导结构有三种:第一种可与普通标准单模光纤相兼容,第二种可与1.5微米DSF光纤相兼容,第三种的模斑尺寸均小于前两种。实验表明,对这些光纤结构,在 $P_p$ 较小时, $\text{Er}^{3+}$ 限定在纤芯附近可改善增益及增益系数,但在高泵功率时改善不大。当波导参量 $\lambda_p=1480\text{nm}$ 时,截止波长 $\lambda_c$ 从1400nm减小时,G增大,且在800~1000nm范围有最佳值。当波导参量铒光纤数值孔径NA增大时增益系数增大;理论预期值:当 $\text{NA}=0.4$ 、 $\lambda_p=900\text{nm}$ 时,增益系数可达23dB/mW。波导参量芯包(芯与包层)折射率差 $\Delta$ 的大小影响增益及弯曲损耗,弯曲损耗的问题与EDFA封装时铒光纤要成1~2cm的线圈有关; $\Delta$ 增大时弯曲损耗减小,增益系数增大,但这时铒光纤与前后光纤器件的光纤连接损耗增大,因而要统一考虑, $\Delta$ 的典型值为0.8~1.2%。(2)泵浦波长的影响。在EDFA设计中,铒光纤的波导设计是决定效率的主要因素,但泵浦波长的选择对效率、信噪比及输出功率的大小的影响也是举足轻重的。实验及应用表明,820nm、980nm和1480nm三个波长可采用半导体激光器,这有利于EDFA的小型化包装及实用化,820nm附近可用成熟的LD作泵源,价格也低,但有激发态吸收(ESA)影响,使泵浦效率和增益系数较低;980nm和1480nm两个波长上既没有ESA,泵浦

# CATV数字自动分段加解扰

## 系统基本原理与基本功能

张广田 山东苍山广播电视局

摘要:介绍模拟有线电视数字自动分段加解扰系统的构成、基本原理、基本功能及其与数字电视传输和接收的关系

关键词:CATV 加解扰 数字自动分段 基本原理与功能

### 1 系统构成

数字自动分段加解扰系统主要有加扰设备、解扰设备和寻址管理系统三部分。它与有线电视前端和网络有机地结合就构成了完整的有线电视自动分段加解扰系统,如图1所示。

加扰设备就是在电视台的前端或者在传输线路上对需加扰的电视节目进行处理的设备,每一路电视信号都需要配置一套加扰设备。每一套加扰设备都集成了三项功能:同步功能、视频预处理功能和视频加扰功能。数字自动分段加扰系统的加扰方式可选择视频加扰、射频加扰或中频加扰,应用灵活。其中视频加扰方式借助同类再生技术,并辅以各种视频特征预处理技术,大大提高了加扰性能,是首选的加扰方式。

解扰设备,又称解扰器,电视用户通过解扰器对加扰过的电视信号进行解扰后才能正常收看。电视用户需按时缴纳收视费,欠费用户的解扰器将会自动停止解扰,直至用户续交费用方可开通。数字自动分段加解扰系统的解扰设备具有自动切换收视段的功能,

准确性高、切换速度快;并且该解扰设备具有很强的网络适应性,能够在信号电平较低的环境中正常工作。数字自动分段解扰器的通讯协议应用了“单机独立密钥”技术,随机生成一个针对当前芯片号的密钥。由于每台解扰器的芯片号都有所不同,因此其密钥也都互不相同,寻址机所传送的信息当中,该解扰器只能解读其密钥对应的信息。该技术使得任何一个解扰器的安全性都彼此独立,能够防范从软件方面入手大批量破解系统情况的发生。应用“单机独立密钥”技术后,由于设计到对每一台解扰器分别发送不同的数据流,寻址速度也相应提高。目前该系统的寻址速度约为5000户/秒,每分钟的寻址户数约为30万户。

寻址管理系统是整套加解扰系统的中央控制单元,所有解扰设备的工作状态都由其发布的指令而决定;收费管理人员也通过寻址管理系统来对整套系统或者某一台解扰器发布指令。寻址管理系统由主服务器、寻址管理主机和寻址调制器构成。整套系统的收费管理软件安装于主服务器上,管理人员通过软件的操作把相应指令发送给寻址管理主机,寻址调制器再

效率又高,又可用LD作光源,因而是最佳泵浦带,但哪一个最好尚不能定论,而且也与使用要求有关,但一般而言,980nm泵浦可获得最高的增益系数及量子极限的噪声系数(NF=3dB),而1480nm泵浦时可获得较大的饱和输出功率。对于分布式放大器,在980nm

泵浦时,由于受瑞利散射的限制,光纤长度仅限于几百米,尤其在1550nm波长下使用时,980nm时的光纤损耗太大;相反,对于1480nm泵浦,光纤损耗较低(0.2~0.3dB/km),使光纤可长达10km以上。▲

(未完待续)