

EDFA 带来光纤通信新突破

传统的光纤长途传输系统每隔一定距离就要增加一个再生中继器以保证信号的质量，再生中继器的主要作用是进行光—电—光转换，并在光信号转为电信号时进行再生、整形和定时处理，以恢复信号的形状和幅度，然后再转换回光信号，沿光纤线路继续传输。

这种方式有许多缺点。首先，通信设备复杂，系统稳定性和可靠性不高，在多信道的光纤通信系统中更为突出。因为每个信道均需要进行波长解复用，然后是光—电—光变换，经波分复用后再送回光纤信道传输，导致设备更复杂、费用更高。其次，信号容易失真。再次，传输容量受到一定的限制，电子线路的 10Gb/s 的响应极限已经成为通信速率的“电子瓶颈”。

在光—光直接放大取代光—电—光转换的需求驱动下，光放大器应运而生。目前已有几种光放大器，掺铒光纤放大器工作波长在靠近光纤损耗最小的 1.55nm 波长区，比其他光放大器更引人注意。

铒离子的能级结构及 工作原理

EDFA 是利用光纤中的 Er^{3+} 离子产生受激辐射进行光波放大。在一定的泵浦光下， Er^{3+} 离子被激发到较高能级，形成粒子数反转，并产生放大的自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE)。一般条件下的典型 ASE 谱如图 1 所示。

铒离子的外层电子具有 3 个能级结构，如图 2 所示。其中，1 能级代表基态，能量最低；2 能级代表中间能级，亚稳态能级；3 能级代表激发态，是高能级。当用高能量的泵浦激光器来激励掺铒光纤时，可以使铒离子的束缚电子从 1 能级大量激发到 3 能级上。然而高能级是不稳定的，铒离子很快会经历无辐射衰减（即不释放光子）落入 2 能级，受激电子将发出很宽光谱范围的光，称为荧光带。当泵浦光足够强时，可以使 2 能级和 1 能级之间形成电子的反转分布。如果入射信号光的波长恰好落在上述荧光带上，那么当泵浦光与信号光同时通过该掺铒光纤时，荧光带能量会转移到信号光上，即信号光可以通过受激辐射过程从离子系统不断获取能量，进而获得放大信号。由于泵浦光与信号光在光纤中均以导波形式传输，因此二者之间可以有效地交换能量，效率相当高。

EDFA 结构由五大部分组成

EDFA 一般由掺铒光纤、泵浦光 (PUMP-LD)、光无源器件、控制单元和通信接口这五个部分组成。光无源器件包括：光波分复用器 (WDM)、光隔离器 (ISO)、光纤连接器 (FC/APC) 与光耦合器 (COUPLER)。EDFA 的关键部件是掺铒光纤、高功率泵浦源、作为信号和泵浦光复用的波分复用器以及为了防止反馈和减小系统噪声在输入和输出端使用的光隔离器。为了使 EDFA 稳定可靠工作，泵浦光源自动温度和功率控制非常重要。

掺铒光纤

光纤放大器能够产生光放大作用的关键是具有增益特性的掺铒光纤，因此设计优异的掺铒光纤是技术关键所在。EDFA 的增益与许多参数有关，如铒离子浓度、放大器长度、芯径及泵浦光功率等。

泵浦源

对泵浦源的基本要求是高功率和长寿命，这是保证光纤放大器性能的主要因素。掺铒光纤可以在几个波长上有效地激励，最初采用 1480nm 的 InGaAs 多量子阱 (MQW) 激光源，该波长处的泵浦增益系数较高，而且其波长与现有实用化的 InGaAs 激光器相匹配。980nm 波长的泵浦致率高、噪声低，它是未来的发展方向。由于获得高功率、长寿命泵浦源的技术比较困难，因此目前泵浦主要采用 1480nm 的 MQWInGaAsP 激光器，其输出功率可达到 100mW。当然，泵浦功率也不宜太大。

波分复用器

EDFA 中的波分复用器主要是使泵浦光与信号光进行复合，对它的要求是插入损耗低，适用的 WDM 器件主要有熔拉锥形光纤耦合器和干涉滤光器，前者具有更低的插入损耗和制造成本，后者具有十分平坦的信号频带和出色的与极化无关的特性。

光隔离器

在输入、输出端插入光隔离器是为了抑制光路中的反射光返回光源侧，保障系统稳定工作并降低噪声。对隔离器的基本要求是插入损耗低，反向隔离度大。

从输入和输出光中分出一部分光 (1%左右) 送到光探测器 (PIN)，由控制单元对光纤放大器的工作进行不间断地控制，监控接口向传输系统提供光纤放大器的工作状态信息，确保光纤放大器作为传输系统的一个部件，纳入到统一的网络监控之中。图 3、图 4、图 5 给出了三种典型 EDFA 的结构。

EDFA 的特性

功率增益

EDFA 的功率增益增益 G (Gain) 定义为输出信号功率与输入信号功率的比值，通常取对数形式，单位是 dB，一般为 15dB~40dB，工程上实际应用的光放大器功率增益一般只有十几 dB。

由图 6 可知，当泵浦功率增加时，信号功率增益迅速增加，然后趋于饱和。功率增益和掺铒光纤长度也有很密切的关系。由图 7 可知，掺铒光纤有一个可使功率增益最大的最佳长度，但在噪声特性要求较高的场合，使功率增益最大时不一定是最佳的长度。

饱和输出功率

饱和输出功率 $P_{s.sat}$ 定义为放大器增益下降 3dB 时的输出信号功率，或者用 0dBm 输入信号功率对应的输出信号功率作为放大器的最大输出功率，单位为 dBm，通常为 8dBm~15dBm。该值随泵浦功率而增加，为了获取高输出功率，要求输入功率大且泵浦功率强。输出功率并不总是与输入功率成比例的，而是呈现饱和趋势，如图 8 所示。

噪声指数

噪声指数 NF (Noise Figure) 定义为放大器的输入信噪比与输出功率信噪比之比，用对数表示，单位为 dB。

也可以表示为 $NF=2\mu\alpha$ ， $\mu\alpha$ 是与泵浦源有关的系数。对于 1480nm 泵浦源和 980nm 泵浦源， $\mu\alpha$ 分别为 1.3~1.8 和 1.05~1.1。NF 的最小理想值是 2.1dB~3.6dB，实际对于 1480nm 泵浦源，NF 的典型值为 4dB~6dB；对于 980nm 泵浦源，NF 可达 3.2dB~3.4dB。

EDFA 的噪声来自信号和自发辐射以及自发辐射之间的差拍噪声，很大程度上取决于 Er^{3+} 由高能位降至低能位时的自发辐射。自发辐射经放大后成为放大的自发辐射场，即所谓的自发辐射噪声功率 PASE，通常大部分自发辐射之间的差拍噪声可以利用光带通滤波器滤除。

增益带宽

增益带宽定义为从放大器的最高增益下降 3dB 时所对应的信号波长范围，单位为 nm。EDFA 的放大有一定的光频范围，不能无限制地放大，其典型的光频带宽为 35nm。

动态范围

动态范围定义为放大器工作于饱和区时保持恒定信号输出功率 (± 0.5 dB) 所对应的输入信号功率变化范围，单位为 dB。

灵活应用 EDFA

EDFA 按所处系统中的位置和功能分为三种基本类型：功率放大器 (power amplifiers)、中继放大器 (in-line amplifier) 和前置放大器 (preamplifiers)。

用作功率放大器

将光纤放大器直接放在光发送器之后，放大输入到光纤中的光功率，即提高光纤通信系统发射端实际进入光纤中的光功率，可以减轻对光源输出功率要求高的压力，同时也可以解决将高功率的光从光源有效注入光纤的耦合问题。这类功率放大器应工作在深饱和区，要求在保持适中的增益和噪声系数下提供尽可能高的输出功率。

用作前置放大器

将光纤放大器放在接收端探测器之前，对传输光纤中的已衰减的光信号进行放大，然后送至探测器，可以避免热噪声，提高系统接收端的信噪比。这类前置放大器工作在小信号区域，要求有最小的噪声系数和最大的非饱和增益。

用作中继放大器或在线放大器

将光纤放大器设在传输线路中，对传输过程中的光信号直接进行放大，特别是多波长信道，可对多个信道的信号光同时进行放大。这种在线放大器取代了传统的光—电—光中继器，使光纤通信从庞大复杂的设备中解放出来，有助于全光通信的实现。对在线放大器的要求介于前面两种

光纤放大器之间，即需要有适中的增益和输出功率以及较小的噪声因子。用于多路传输系统中，还应具有足够的增益带宽并保持增益均衡。另外一个关键是需要它提供自动增益控制，即当输入信号光功率大时，光纤放大器的增益要低；当输入信号光功率小时，放大器的增益要高，可以通过让放大器工作在增益压缩区来实现。光纤放大器工作在饱和输出区时，就具有一定的自动增益控制功能。

掺铒光纤放大器的应用范围很广，包括：

- ◆ 干线高速光纤通信系统。不论是陆上光纤骨干网还是海底跨洋通信干线，都取消了传统的电再生中继器，广泛采用了掺铒光纤放大器，无中继距离延伸到 150km~200km。
- ◆ 密集波分复用系统（DWDM）。增益平坦型的掺铒光纤放大器是 DWDM 传输系统的关键部件，能够同时放大多路波长不同的光信号。
- ◆ 光纤电视 CATV 传输/分配系统。近年来，EDFA 在光纤 CATV 系统中的应用极大推动了 1.55 μ m 光纤 CATV 系统的发展，是目前 CATV 发展的主流。其主要作用是补偿光纤传输损耗和补偿光分路器的分支损耗，将 EDFA 用在 CATV 光发射机后及链路中，可以提高光功率、弥补链路损耗、补偿光功率分配带来的功率损失。使用性能良好的 EDFA，可将模拟系统 CATV 的链路长度扩展到接近 200km，EDFA 级联数目达到 4 级，众多用户共用一个前端和发射机也可以极大降低系统的运营成本。
- ◆ 孤子传输系统。EDFA 是光孤子脉冲放大的理想光放大器。
- ◆ 光纤接入网。由于 FTTH 的覆盖范围很大，光纤终端分支太多，会造成用户接收到的光功率过低。若采用 EDFA 放大光功率，能使用户端正常接收，因此在接入网中实现 FTTH 离不开 EDFA。
- ◆ 全光通信系统。光纤放大器是实现全光通信的核心器件。

EDFA 的主要优点包括：

- ◆ 工作波长恰好落在光纤通信的最佳波长区（1300nm~1600nm）。
- ◆ EDFA 的主体也是一段光纤，它与线路光纤的耦合损耗很小，甚至可达到 0.1dB。
- ◆ 噪声指数低，一般为 4dB~6dB。
- ◆ 增益高，约 20dB~40dB；饱和输出功率大，约 8dB~15dB。
- ◆ 频带宽，在 1300nm 和 1550nm 窗口各有 20nm~40nm 带宽，可进行多信道传输，便于扩大传输容量，从而节省成本费用，对比特率高于 25Gb/s 的系统有利。
- ◆ 光纤放大器的特性与光纤极化状态无关，放大特性与光信号的传输方向也无关，可以实现双向放大。
- ◆ 所需泵浦功率较低（数十 mW），泵浦效率却相当高。用 980nm 光源泵浦时，效率为 10dB/mW；用 1480nm 光原泵浦时，效率为 5.1dB/mW。

- ◆ 在多信道应用可进行无串话传输。
- ◆ 结构简单、可靠性高、体积小，可进一步降低成本和售价。
- ◆ 对不同传输速率的数字体系具有完全的透明度，即与准同步数字体系（PDH）和同步数字体系（SDH）的速率兼容，调制方案可任意选择。
- ◆ 中继器中只有低速电子装置和几个无源器件。
- ◆ 需要的工作电流比光—电—光再生器小，因此可大大减小远供电流，从而降低对光缆的电阻和绝缘性的要求。

使增益平坦为 EDFA 研究重点

光纤通信对 EDFA 的性能要求包括：低噪声系数（NF 在 5dB 以下）、高增益和高增益系数、高输出功率、宽的放大带宽及平坦度等。目前掺铒光纤放大器的增益已达到 50dB 以上，噪声系数在 3dB 以下。各国研究单位仍对在 EDFA 进行各种研究，以期得到更好的性能，重点在全部带宽内提供平坦的增益特性，保证每路波长的增益相同，以防止各路之间发生路际串扰，同时与 DWDM 系统的广泛商用相适应。EDFA 继续进行研究的主要内容包括：使增益平坦、对瞬态效应进行抑制、增益箝位、监控技术、降低噪声及提高输出功率等。