

实验八 掺铒光纤放大特性测量

一 实验目的

1. 了解掺铒光纤放大器的工作原理及相关特性。
2. 掌握掺铒光纤放大器性能参数的测量方法。

二 实验原理

2.1 EDFA技术的重要意义

掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, 简称EDFA)的出现是光纤通信发展史上一个里程碑[16, 17, 18]。1986年英国南安普敦大学(University Of Southampton)制作出了最初的掺铒光纤放大器。在此之前,由于不能直接放大光信号,所有的光纤通信系统都只能采用“光-电-光”中继方式。光纤放大器可直接放大光信号,这就可使“光-电-光”中继变为“全光”中继。这是一次极为重要的飞跃,把光通信推向了一个新的阶段,其意义不亚于当年用晶体管代替电子管。当作为掺铒光纤放大器泵浦源的 $0.98\mu\text{m}$ 和 $1.48\mu\text{m}$ 的大功率半导体激光器研制成功后,掺铒光纤放大器趋于成熟,进入了实用化阶段。掺铒光纤放大器的意义不仅在于可进行全光中继,它还在多方面推动了光纤通信的发展,引起了光纤通信的变革。其中最突出的是在波分复用光纤通信系统中的应用。波分复用是在一根光纤上传输多个光信道,从而充分利用光纤带宽,有效扩展通信容量的光纤通信方式。由于掺铒光纤放大器具有约 40nm 的极宽带宽,可覆盖整个波分复用信号的频带,因而用一只掺铒光纤放大器就可取代与信道数相应的“光-电-光”中继器,实现全光中继。这极大地降低了设备成本,提高了传输质量。这一优越性推动了波分复用技术的发展。现在EDFA+WDM已成为高速光纤通信网发展的主流,代表着新一代的光纤通信技术。

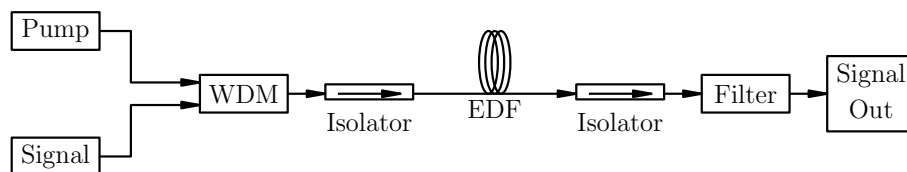


图 8.1: EDFA工作原理示意图。

图8.1为EDFA原理光路图,信号光与泵浦光在铒光纤内可以在同一方向(同向泵浦)、相反方向(反向泵浦)或两个方向(双向泵浦)传播。其主体是泵浦源与掺铒光纤。掺铒光纤放大器的基本工作原理与一般光放大器相同,工作物质粒子经泵浦源作用,由低能级跃迁到高能级(一般通过另一辅助能级),在一定的泵浦强度下,得到粒子数反转分布而具有光放大作用,当工作频带范围内的信号光输入时便得到放大。EDFA细长的结构使得有源区能量密度很高,光与物质的作用区很长,有利于降低对泵浦源功率的要求。WDM为波分复用器,它的作用是将不同波长的泵浦光和信号光混合而送入掺铒光纤。对它的要求是能将两信号有效地混合而损耗最小。光隔离器的作用是防止反射光对光放大器造成不利影响,保证系统稳定工作。滤波器的作用是滤除放大器的噪声提高系统的信噪比。

2.2 EDFA的工作原理与特性

Er^{3+} 离子能级结构非常复杂,但参与光放大的能级结构比较简单,如图8.2所示。泵浦光可以用 980nm ,和 1480nm 的光源。当用 980nm 泵浦时,基态电子跃迁到 $^4I_{11/2}$ 能级上,但该能级寿命很短,很快无辐射跃迁到 $^4I_{13/2}$ 能级上,该能级为亚稳态,能级寿命长($\sim 10\text{ms}$)。因此容易实现粒子数反转,在入射信号作用下产生受激辐射,将弱信号放大。当采用 1480nm 光泵浦时,直接跃迁到亚稳态 $^4I_{13/2}$ 上,产生粒子数反转和放大。由于这些能级都有一定的宽度,因此,能够放大的频率范围也较大。尤其是采用双波段EDFA时,频带宽度能够达到 80nm ,完全覆盖整个WDM的频带。

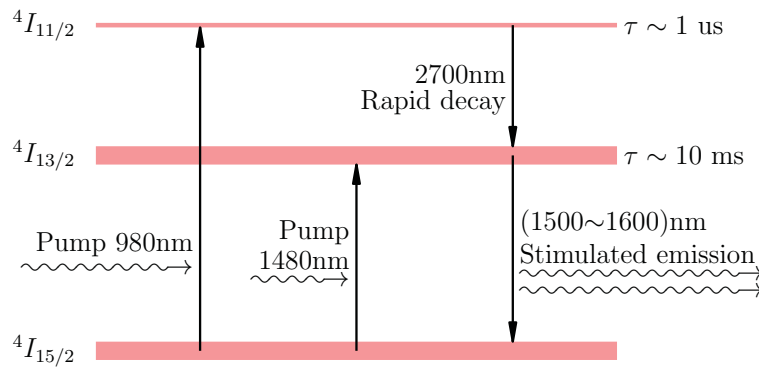


图 8.2: 参与光放大的Er³⁺能级结构, 以及泵浦与信号关系示意图。

自发辐射(ASE)是掺铒光纤放大器的一个重要问题。在激光放大器和激光器中一样存在着自发辐射, 在激光器中自发辐射不可或缺, 输出的激光最初来自自发辐射。激光腔正是从最初的宽谱自发辐射中选择了特定频率的光进行放大输出的。如果说自发辐射在激光器中的作用是有用的“种子”, 则在EDFA中, 它充当的角色却是有害的“稗子”。放大器是用来放大输入光信号的, 自发辐射与光信号伴生却毫无益处。它与待放大的光信号一起参与激光物质粒子的受激辐射, 与信号竞争, 自身得到放大, 同时消耗高能级的粒子, 降低信号增益。更严重的是, 放大的自发辐射传到接收端, 在对信号光进行检测时, 与信号光一起形成拍频噪声。这将降低系统的信噪比, 限制光接收机的灵敏度。图8.3为加入1536nm和不加入1536nm信号光时的输出光谱,可以看出放大器自发辐射对系统性能有很大的影响。

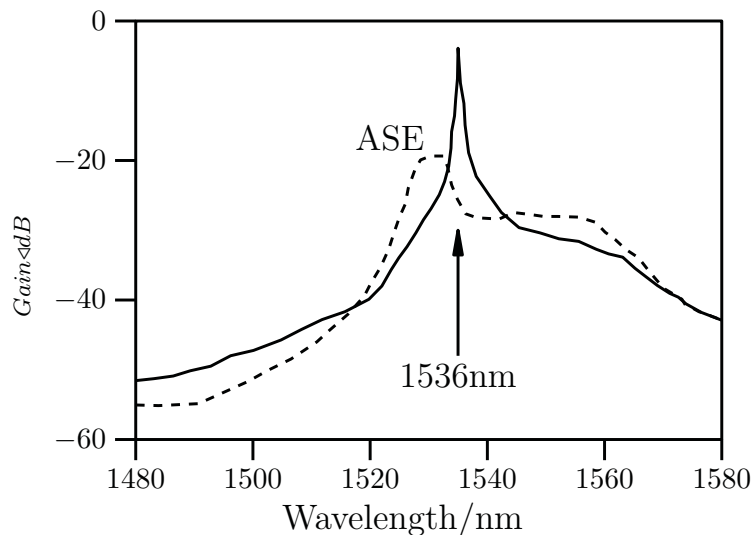


图 8.3: 放大器自发辐射的影响。

EDFA的增益与泵浦强度及光纤长度有关。图 8.4给出了掺铒光纤放大器小信号增益 G 与泵浦功率 P 及光纤长度 l 的关系曲线。它的泵浦光波长为 $1.48\mu\text{m}$, 信号光波长为 $1.55\mu\text{m}$, 采用了典型的光纤参数。图8.4(a)用泵浦光功率 P 做参变量, 给出了增益 $G(\text{dB})$ 与光纤长度 l 之间的关系曲线。在 l 较短处, 增益沿光纤长度增加很快, 当 l 超过某值时, 增长变慢。这是由于放大介质中粒子数的消耗。在某一长度处, 信号不再被放大, 超过此长度后, 信号反而因衰减而减小。因而就放大器的总增益而言, 存在一最佳的光纤长度。而这一最佳光纤长度又与泵浦功率 P 大小有关。图8.4(b)以光纤长度 l 做参变量给出了增益 G 与泵浦功率 P 之间的关系, 可见增益与光纤长度和泵浦功率有关。因此在给定的掺铒光纤的情况下, 应选择合适的泵浦功率与光纤长度, 进行优化设计。上述光纤的特性可在所有EDFA中观察到。

实际EDFA的增益随频率变化关系还与基质光纤及其掺杂有关。图 8.5给出了具有不同组分掺铒光纤的增益谱, 可见增益谱具有双峰。增益谱的尖锐程度及带宽对光纤芯子的掺杂情况十分敏感。纯硅的增益谱很窄, 在 $1.53\mu\text{m}$ 处, 3dB带宽为10nm。合适的掺杂可将增益谱展宽, 由图 8.5可见, 掺入Al、P展宽了频带。人们在研究通过改变掺杂以展宽增益带宽方面做了大量工作, 现在EDFA的增益谱宽已可达上百纳米, 而且增益谱较平坦。即使掺铒光纤放大器芯子的组分相同, 不同放大器的增益谱也会有所差别, 这是因为增益谱还与光纤长度有关的原故。由于泵浦功率沿光纤变化, 所以各处的增益系数是不同的, 而增益须在整根光纤上积分得到。这一特性可用来通过选择光纤长度得到较为平坦的增益谱。

光信号的放大输出波形与光信号脉冲的比特率基本无关, 但是与工作区有关, 或者说与脉宽和增益

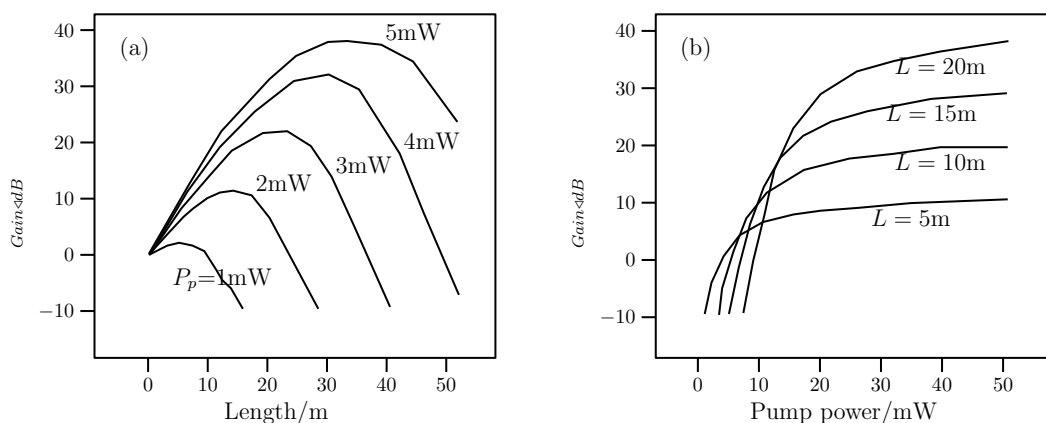


图 8.4: EDFA放大特性示意图。

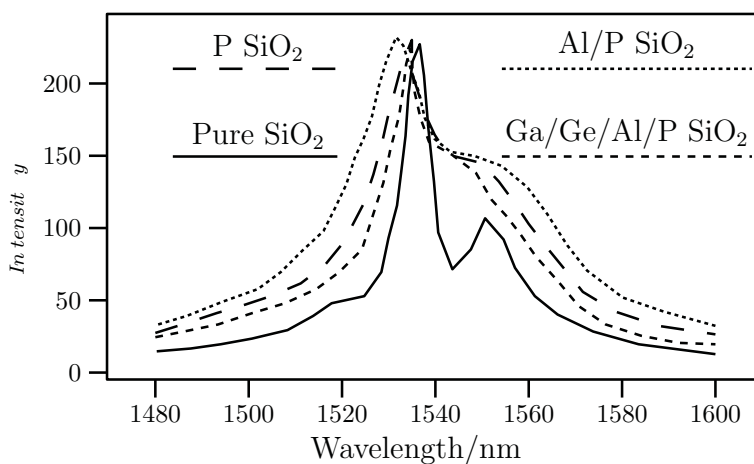


图 8.5: 不同参杂情况下的EDFA增益谱。

有关。通常在小信号线性放大工作区，放大过程中基本不产生波形失真，但是在在大信号饱和放大工作区时，由于增益饱和或增益压缩的影响，将导致输出波形失真，这种现象称为增益图形效应或简称图形效应。放大输出信号波形的失真程度决定于光脉冲宽度和增益恢复时间。如图8.6所示，当脉宽远大于增益恢复时间时，增益在很短的时间内就能恢复，波形失真很小，这种失真对数字脉冲传输不产生重要影响，因而不存在图形效应。当脉宽与增益恢复时间可比时，波形失真和图形效应将变得严重。

三 实验内容与操作

本实验要求正确搭建光路，测量出EDFA的 G_s-P_p ，以及增益谱曲线。加深对EDFA放大特性的理解。本实验要实验光谱仪，有关光谱仪的操作请参考仪器说明书。

3.1 实验光路

实验光路如图8.7所示。信号和泵浦通过WDM输入到EDF中，然后测量放大前后的光功率。

3.2 操作步骤

1. 实验装置：按图 8.7示光路连接实验装置，将实验仪主机背板通讯接口用串行通讯电缆连接至计算机主机COM1口，打开实验仪主机电源后再运行计算机上的测试软件。
2. 掺铒光纤放大器 G_s-P_p 特性曲线测量
 - (a) 设置LD1工作模式 (MOD) 设置为恒流模式 (ACC)，将1550nm激光器输出直接连接至OPM Sensor，调节1550nm激光器输出功率为0.1mW。
 - (b) 将1550nm激光器输出和OPM Sensor输入恢复为图8.7所示连接，设置LD2工作模式 (MOD) 为恒流模式 (ACC)，驱动电流 (I_c) 置为0mA。

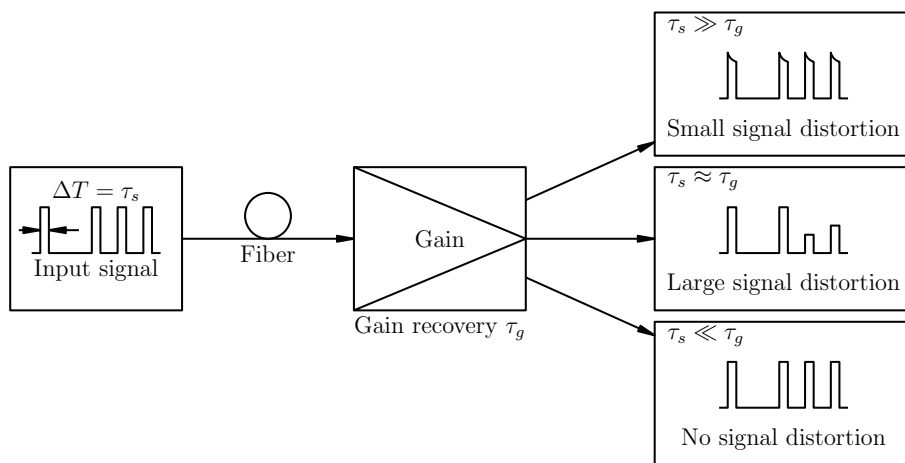


图 8.6: EDFA的响应特性以及信号失真。

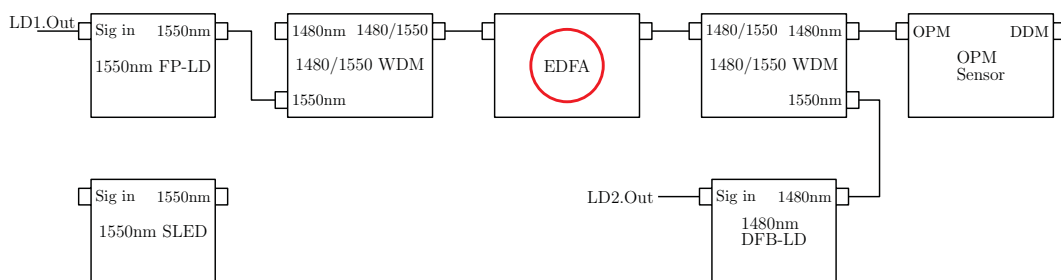


图 8.7: 掺铒光纤放大器实验装置示意图。

(c) 缓慢增加1480nm泵浦激光器的驱动电流，从0mA至300mA每隔5mA记录一次OPM功率数据，求信号增益，作 $G_s \sim P_p$ 曲线。

3. 掺铒光纤放大器瞬态响应特性测量：

- 连接函数信号发生器输出SIG.OUT至激光控制器调制信号输入端LD1.IN，此信号经三通连接至示波器CH1。
- 将EDFA输出的1550nm光信号连接至InGaAs PIN光电二极管，PIN管输出连接至PD1输入，PD1输出连接至示波器CH2。PD1量程置于10mA档。
- 设置SIG工作模式(MOD)为方波信号(SQU)，信号频率50Hz，信号幅度5V。
- 设置LD1工作模式(MOD)为数字调制模式(ODM)，驱动电流(I_c)置为30mA。
- 设置LD2工作模式(MOD)为恒流模式(ACC)，驱动电流(I_c)置为100mA。
- 测量EDFA的增益恢复时间。观察掺铒光纤受激自发辐射特性(ASE)。

4. EDFA增益谱测量：

- 将1550nm SLED控制信号连接至LD1.OUT，设置LD1工作模式(MOD)为恒流模式(ACC)，驱动电流(I_c)置为100mA。
- 将1550nm SLED输出光信号耦合进入单模光纤，仔细调节光纤头位置，使得耦合进入单模光纤的光功率最大。
- 将1550nm SLED光信号连接至光谱分析器，输入狭缝置2mm（默认值即为2mm），输出狭缝置1mm。
- 将光谱分析器功率探头输出连接至光功率计输入端OPM.IN，OPM量程(RTO)置10nW档。测量1550nm SLED输出光谱，波长范围1520 ~ 1650nm，波长间隔0.1nm，将此光谱设为增益谱计算基准（见软件操作窗口菜单的“数据分析”以及“setbase”）。
- 将1550nm SLED光信号输入EDFA，EDFA输出光信号连接至光谱分析器，输入狭缝置2mm，输出狭缝置1mm。OPM量程(RTO)置1mW档。
- 设置LD2工作模式(MOD)为恒流模式(ACC)，驱动电流(I_c)置为200mA
- 测量EDFA输出光谱，波长范围1520 ~ 1650nm，波长间隔0.1nm。
- 根据两次测量结果，求出EDFA的增益谱。

四 思考题

实验完成后，请回答如下问题：

1. EDFA放大技术在光通信领域具有什么样的重要意义？
2. EDFA放大器的工作原理是什么？它有什么优点，和缺点？
3. 正向泵浦、反向泵浦、和双向泵浦之间有什么异同？

注意事项

1. 系统上电后禁止将光纤连接器对准人眼，以免灼伤。
2. 光纤连接器陶瓷插芯表面光洁度要求极高，除专用清洁布外禁止用手触摸或接触硬物。空置的光纤连接器端子必须插上护套。
3. 所有光纤均不可过于弯曲，除特殊测试外其曲率半径应大于30mm。
4. 光纤头与1550nm SLED管芯距离必须大于1mm。