

# 实验十二 光纤喇曼放大特性

## 一 实验目的

1. 了解单模光纤拉曼非线性效应的机理与特性；
2. 掌握分布式光纤喇曼放大器特性参数的测量方法。

## 二 实验原理

### 2.1 光纤的非线性效应

任何介质在强电磁场作用下都会呈现非线性特性，光纤当然也不例外。虽然石英材料本质上不是高非线性材料，但由于光纤传输距离很长，并将光场限制在横截面很小的区域，所以光纤中的非线性现象仍然十分明显，对光信号的传输有重要影响，并在许多方面得到应用，光纤非线性已发展成为非线性光学的一个重要分支学科——非线性光纤光学[16]。

介质的非线性效应，与施加到介质上的场，及其影响下束缚电子的非谐振运动有关，结果导致电偶极子的极化强度 $P$ 随电场 $E$ 的非线性变化。二者之间存在一般的关系：

$$P = \epsilon_0[\chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(2)} : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)} : \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots] \quad (12.1)$$

式中， $\epsilon_0$ 为真空中的介电常数； $\chi^{(j)}$  ( $j = 1, 2, 3, \dots$ ) 为 $j$ 阶电极化率，考虑光的偏振效应时， $\chi^{(j)}$ 是 $j+1$ 阶张量。线性电极化率 $\chi^{(1)}$ 对 $P$ 有最重要的作用，它主要影响介质的折射率和衰减常数。二阶电极化率 $\chi^{(2)}$ 会引起二次谐波与混频的产生。但是 $\chi^{(2)}$ 只在某些分子结构不具有反演对称的介质中才存在，而在 $\text{SiO}_2$ 这种对称结构的分子中， $\chi^{(2)} = 0$ ，因而在石英光纤中通常不显示有二阶非线性效应，但当纤芯中有掺杂材料时，会显示一定的二阶非线性效应。

### 非线性折射率与自相位调制

光纤中最低阶的非线性效应来自于三阶电极化率 $\chi^{(3)}$ ，它是引起三次谐波、四波混频、非线性折射率与自相位调制等现象的原因。光纤中大部分非线性效应起源于非线性折射率。对于石英光纤，折射率的非线性影响一般很小( $< 10^{-7}$ )。折射率非线性成分的出现将引起导模传播常数的变化，使传播常数增加一附加项。该分量的出现引起模场相位随距离的非线性变化。由模场自身产生的非线性效应而引起的非线性相移称为自相位调制 (SPM)。

非线性效应产生的自相位调制一般不大，对只用检测功率的方法解调信号的光波系统无关紧要，但在级联光放大系统和 WDM 系统中则不容忽视，在相干光波系统中也不能忽视。因为相干光波系统要求有高的相位稳定性。自相位调制还将导致光脉冲的频谱展宽或频率啁啾，影响光波系统的性能。但是在光纤的负色散区，这种自相位调制与色散相互作用，能够支持超短光孤子脉冲传输，实现新的光孤子通信，这一效应是非线性折射率的重要应用。

当采用不同的载频的两个或多个信号在光纤中同时传输时，折射率与光强的相关性将导致另一种非线性效应，即交叉相位调制 (XPM)，它表明一个特定信道光信号产生的非线性相移不仅取决于其自身的场强或功率，也取决于其他信道信号的功率。目前，XPM已成为多信道光波系统主要的功率限制因素。

### 受激非线性弹性散射

在非弹性散射中，散射光频率下移，光场把部分能量传递给介质，称为受激非弹性散射。光纤中有两种非线性散射效应，它们都与石英的振动激发态有关，分别为受激喇曼散射 (SRS) 和受激布里渊散射 (SBS)，它们都以一个入射场的光子 (通常称为泵浦) 的湮灭，产生一个频率下移斯托克斯频率的光子，及适当能量和动量的声子为特征。两者的主要差别是SRS中参与的是光学声子，而在SBS中参与的是声学声子。同时，如果介质能吸收一个具有恰当能量和动量的声子，也能产生有更高能量的光子，称为反斯

托克斯频率。尽管SRS与SBS的起因非常相似，但由于声子与光子不同的色散关系，导致两者之间的一些本质差别。其中一个本质差别是，在单模光纤中SBS只发生在向后方向，而SRS主要是前向方向。

在高功率传输时，光纤中的受激喇曼散射和受激布里渊散射能导致相当大的损耗，一旦入射光功率超过阈值，散射光强度将指数增长。SRS和SBS的阈值功率可通过散射光强度的产生过程来估计。对于SRS来讲，阈值功率 $P_{th}$ 定义为在长度为 $L$ 的光纤输出端因SRS而损耗了50%的输入功率，这个输入功率即为阈值功率，它与光纤的衰减系数 $\alpha$ 、光纤长度 $L$ 、喇曼增益系数 $g_R$ 和光纤的有效横截面 $A_{eff}$ 有关，可近似写为：

$$P_{th} = 16\alpha A_{eff}/g_R$$

对于石英光纤，喇曼增益系数 $g_R$ 可通过实验测得。实验测得的喇曼增益谱非常宽，约为30THz，当泵浦波长为 $1\mu\text{m}$ 时，斯托克斯频移约13THz，峰值增益系数 $g_R \sim 1 \times 10^{-13} \text{m/W}$ ，若取 $\pi\omega^2 = 50\mu\text{m}^2$ ， $\alpha = 0.2\text{dB/km}$ ，那么在 $1.55\mu\text{m}$ 附近， $P_{th} \sim 570\text{mW}$ 。由于光波系统中注入的功率一般低于10mW，因此SRS一般对光纤损耗不起作用。对于SBS，情况有所不同。SBS的阈值功率能用类似于估计SRS阈值功率的方法估计，可表示为：

$$P_{th} = 21\alpha A_{eff}/g_B$$

式中， $g_B$ 为布里渊增益系数。与喇曼增益谱不同，布里渊增益谱很窄，仅约10GHz，峰值增益 $g_B = 10^{-11} \text{m/W}$ ，比 $g_R$ 高两个数量级，这样 $P_{th}$ 可低至1mW，特别是在 $1.55\mu\text{m}$ 最低损耗处，将极大地限制光波系统的注入功率。这些估计中忽略了与入射光有关的谱宽效应。由于石英光纤的布里渊增益谱相当窄，典型谱宽 $< 100\text{MHz}$ ，而多数光波系统脉冲光源谱宽很宽，因而阈值功率可增大至10mW或更高，不过对干光波系统的限制仍不可忽视。

一般情况下，SRS和SBS在光纤通信系统中是一种有害的效应，但由于它们能将合适波长的泵浦场的能量传给另一信号波，使信号光场得到放大而加以利用。例如喇曼增益已用于补偿光孤子传输中因光纤损耗而失去的能量，实现光孤子长距离稳定传输。SRS也能用于制造光纤喇曼激光器和放大器，这种放大器可用作光接收机的前置放大器，也能在多信道通信系统中同时放大多路信号。SBS也能用于制造布里渊放大器。由于其增益谱宽窄，放大器的带宽也很窄，可用于多信道通信系统选择信道，提高接收机灵敏度。

## 参量过程与四波混频

受激散射过程中，光纤作为非线性介质，通过分子振动和声子的参与，起了主动作用。除了通过束缚电子的非线性响应，作为几个光波相互作用的媒质之外，光纤一般起被动作用。起源于介质参量（如折射率的光致调制）的这种过程称为参量过程。参量过程根据其起源可分为二阶和三阶过程。在普通石英光纤中一般不存在二阶参量过程。三阶参量过程源于三阶非线性极化率 $\kappa^{(3)}$ ，涉及四个光波的相互作用，包括三次谐波的产生、四波混频和参量放大等现象。

在多信道光波系统中，特别当信道间隔特别小时（如约1GHz），在相位匹配条件得到满足的情况下，相当部分的信道能量可能转移到由四波混频产生的新光波，这样的能量转移不仅导致了对特定信道的功率损耗，也导致了降低系统性能的信道串音。

在参量过程中，四波混频把强泵浦波能量转给频率发生了上和下频移的两个波。当泵浦波进入光纤并满足相位匹配条件，斯托克斯波和反斯托克斯波就能从噪声开始形成。另一方面，若输入一个满足条件的弱信号，此信号将被放大，同时产生另一新频率波，这种放大称为参量放大，增益称为参量增益。参量过程与参量增益可用于制造光纤参量激光器和光纤参量放大器，这种放大器不存在半导体光放大器和光纤放大器中固有的放大自发辐射噪声。

## 2.2 分布式光纤喇曼放大器

受激喇曼放大器是非线性光学研究中的一个重要问题，自激光器发明后就开展了广泛的研究。光纤中受激喇曼散射的研究始于20世纪70年代初期。研究发现，石英光纤具有很宽的喇曼增益谱（可达40THz），并在13THz附近有一较宽的主峰，如果一个弱信号与一强泵浦光波同时在光纤中传输，并使弱信号波长置于泵浦波的喇曼增益带宽内，则弱信号即可被放大。这种基于SRS机制的光放大器称为光纤喇曼放大器（FRA）。这种放大器如果设置合适的腔镜亦可构成可调光纤喇曼激光器。SRS使一个信道中的能量转移到相邻信道中，使多信道光纤通信系统产生串扰，限制了多信道光纤通信系统的性能，在光纤通信系统设计中应设法避免或消除。FRA的宽带放大特性可用作光纤损耗的分布式补偿放大，实现高速超短光脉冲的稳定透明传输。

图 12.1为FRA的原理性结构示意图，频率为 $\omega_p$ 和 $\omega_s$ 的泵浦光和信号光通过耦合器输入至光纤，当这两束光在光纤中一起传输时，泵浦光的能量通过SRS效应转移给信号光，使信号光得到放大。泵浦光和信号光亦可分别在光纤的两端输入，在反向传输过程中同样能实现弱信号的放大。图 12.2为熔融石英的喇曼增益谱特性曲线。

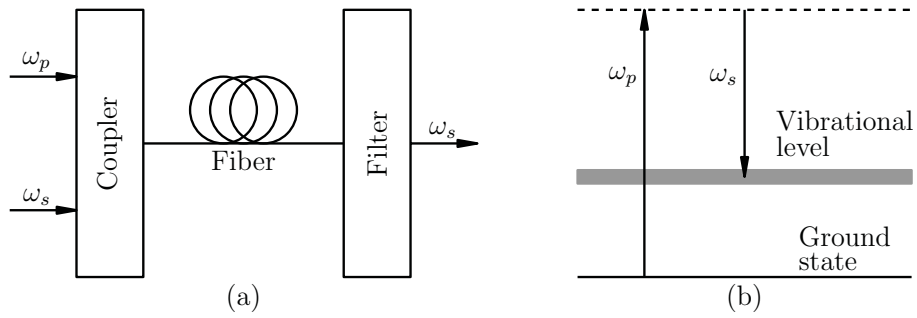


图 12.1: 光纤喇曼放大器及其能级图。

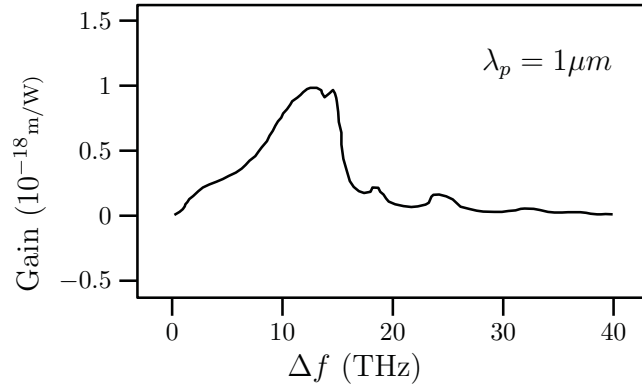


图 12.2: 熔融石英的喇曼增益谱。

光纤喇曼放大器有两种类型和两种应用，一种称为集中式FRA，主要作为高增益、高功率放大，另一种称为分布式FRA，主要作为光纤传输系统中传输光纤损耗的分布式补偿放大，实现光纤通信系统光信号的透明传输。增益与损耗相等时，输出功率与输入功率相等，主要用于光纤通信系统中作为多路信号和高速超短光脉冲信号损耗的补偿放大用，亦可作为光接收机的前置放大器。作为损耗补偿放大应用时，光纤既是增益媒质，又是传输媒质，光纤既存在损耗，又产生增益，增益补偿损耗实现净增益为零的无损透明传输。

### 三 实验装置与内容

本实验要求正确连接光路，测量出光纤拉曼放大的开关增益，及其增益谱。由于拉曼放大的增益系数较低，实验中要选择合适的测量量程，以及高效率的连接耦合，否则实验结果会有较大误差，甚至测量不到信号增益。

#### 3.1 实验装置

光纤喇曼放大实验光路如图12.3所示。

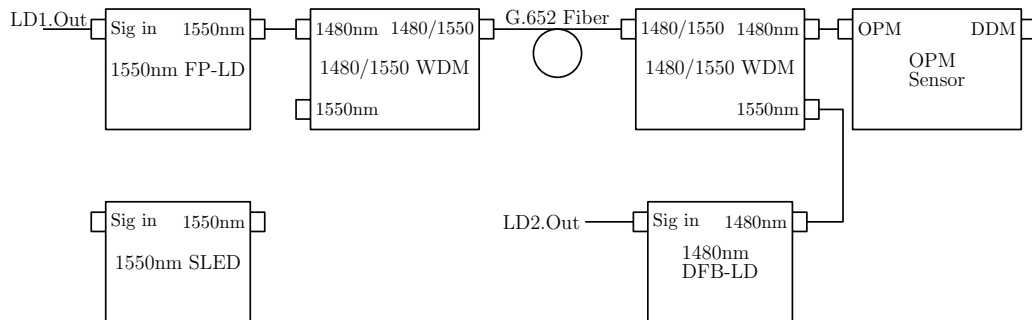


图 12.3: 光纤喇曼放大实验装置示意图。

## 3.2 实验步骤

1. 首先连接实验装置：  
按图 12.3所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. FRA开关增益测量：
  - (a) 设置LD2工作模式 (MOD) 为恒流模式 (ACC)，驱动电流 ( $I_c$ ) 置为0mA。
  - (b) 设置LD1工作模式 (MOD) 为恒流模式 (ACC)，调节1550nm激光器输出功率使得FRA输出功率0.1mW。
  - (c) 设置LD2驱动电流 ( $I_c$ ) 为400mA。
  - (d) 记录OPM功率数据，求FRA开关增益。
3. FRA增益谱测量：
  - (a) 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。
  - (b) 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。
  - (c) 将1550nm SLED光信号连接至光谱分析器，输入狭缝置2mm，输出狭缝置1mm。
  - (d) 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) 置于10nW档。测量1550nm SLED输出光谱，波长范围1500~1700nm，波长间隔0.1nm，将此光谱设为增益谱计算基准。
  - (e) 将1550nm SLED光信号输入FRA，FRA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10nW档。
  - (f) 设置LD2工作模式 (MOD) 为恒流模式 (ACC)，驱动电流 ( $I_c$ ) 置为400mA。
  - (g) 测量FRA输出光谱，波长范围1500 ~ 1700nm，波长间隔0.1nm。
  - (h) 根据上述测量结果，求出FRA增益谱。

## 四 思考题

实验完成后，请思考如下的问题：

1. 光纤的拉曼散射放大与EDFA的放大相比，有哪些优缺点？
2. 光纤中的非线性光学效应有哪些？它们与普通介质中的分线性效应相比，有什么特点？

## 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。