

# 实验五 光纤无源器件特性测量

## 一 实验目的

1. 了解光纤无源器件的工作原理及相关特性。
2. 掌握光纤无源器件特性参数的测量方法。
3. 掌握光纤时域反射法的工作原理和测量方法。

## 二 实验原理

光无源器件有很多种类，主要有光纤连接器、光纤耦合器、光滤波器、光隔离器、波分复用解复用器、光开关、光衰减器、光环形器、偏振选择与控制器等[18, 17, 16]。这些器件在光通信系统中有广泛的应用，对这些器件的工作原理，以及特性的理解非常有必要。

### 2.1 光纤连接器

光纤连接器是使一根光纤与另一根光纤相连接的器件，也叫光跳线，用来实现光信号的平滑无损或低损连接。光纤连接器会引入一定的功率损耗，称为插入损耗，它是衡量光纤连接器质量的主要技术指标之一。另外还有回波损耗、互换性、抗拉强度、温度稳定性、以及插拔次数等参数。通常插拔次数大于1000次。

光纤的连接不像导线那样简单，必须采特殊的结构和材料。目前有多种不同特性不同应用场合的光纤连接器类型，并且性能越高，造价就越高。通常光纤连接器要固定在非常精密的金属套中，用来实现精确的对准。通常用FC（Ferrule connector）表示这种用金属套螺丝连接的圆形接口；另一种接头是矩形嵌入式塑料插拔结构的，用SC（Square Connector）表示；另外一种金属圆形的卡口接头结构，简称ST / BFOC（Straight Tip/Bayonet Fiber Optic Connector）。除此之外，还有很多其他的类型，此处不再赘述。

目前的连接器通常利用一种“物理接触”（Physical contact，简称PC）的抛光方法，即将光纤端面成微球面，因此光纤芯可以直接接触，而不是周围的金属套，这种接触方法通常称为PC（physical Contact）。有些厂家还标定了抛光的级别，出现了UPC（U代表Ultra）和SPC（S代表Super），级别越高插入损耗和回波损耗越小。因此一个光纤连接器可以用“FC / PC”表示。

很多连接器的末端在抛光的时候有一个小的角度，小角度的存在使反射波逃离光纤芯，因此回波损耗很小。由于需要角度的匹配，因此连接的另一端也必须是带角度的抛光结构，否则插入损耗会很大。这种带角度的连接结构通常用APC（Angled physical contact）表示，与上面的PC相对应。为了区分，APC通常用做成绿色的，而无角度的结构通常做成黑色的。例如，一个带角度的FC连接器可应用FC / APC表示，或者更简单的表示为FCA。

### 2.2 光纤耦合器

光纤耦合器是实现光信号分路 / 合路的功能器件，一般是对同一波长的光功率进行分路或合路。光纤耦合器的耦合机理基于光纤的消逝场耦合的模式理论。多模与单模光纤均可做成耦合器，通常有两种结构型式，一种是拼接式，另一种是熔融拉锥式。拼接式结构是将光纤埋入玻璃块中的弧形槽中，在光纤侧面进行研磨抛光，然后将经研磨的两根光纤拼接在一起，靠透过纤芯一包层界面的消逝场产生耦合。熔融拉锥式结构是将两根或多根光纤扭绞在一起，用微火炬对耦合部分加热，在熔融过程中拉伸光纤，形成双锥形耦合区。

光耦合器是一种光无源器件，该领域内的一般技术术语对它也适用，同时，它还另有一些体现自身特点的参数。

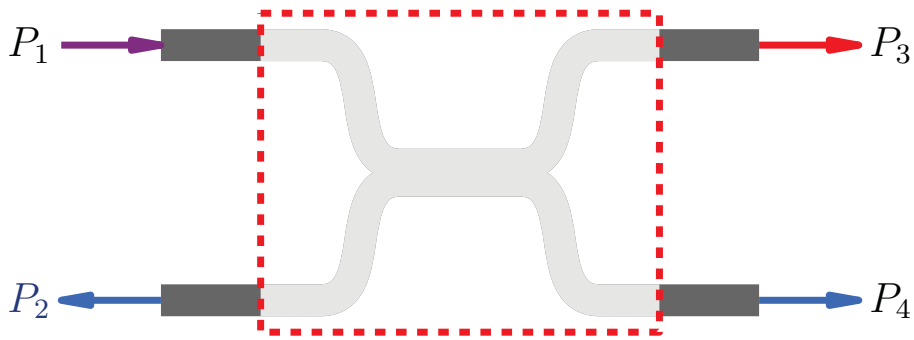


图 5.1: 3dB 光纤耦合器结构示意图。

### 插入损耗(Insertion Loss)

就光耦合器而言，插入损耗定义为指定输出端口的光功率相对全部输入光功率的减少值。该值通常以分贝(dB)表示，数学表达式为：

$$IL_i = -10 \log \frac{P_{O_i}}{P_I}$$

其中， $IL_i$ 是第*i*个输出端口的插入损耗； $P_{O_i}$ 是第*i*个输出端口测到的光功率值； $P_I$ 是输入端的光功率值。

### 附加损耗(Excess Loss)

附加损耗定义为所有输出端口的光功率总和相对于全部输入光功率的减小值。该值以分贝(dB)表示的数学表达式为：

$$EL = -10 \log \left( \sum \frac{P_{O_i}}{P_I} \right)$$

对于光纤耦合器，附加损耗是体现器件制造工艺质量的指标，反映的是器件制作过程带来的固有损耗；而插入损耗则表示的是各个输出端口的输出功率状况，不仅有固有损耗的因素，更考虑了分光比的影响。因此不同类型的光纤耦合器之间，插入损耗的差异，并不能反映器件制作质量的优劣，这是与其他无源器件不同的地方。

### 分光比(Coupling Ratio)

分光比是光耦合器所特有的技术术语，它定义为耦合器各输出端口的输出功率的比值，在具体应用中常常用相对输出总功率的百分比来表示：

$$CR = P_{O_i} / \sum P_{O_i} \times 100\%$$

例如对于标准X形耦合器，1:1或50:50代表了同样的分光比，即输出为均分的器件。实际工程应用中，往往需要各种不同分光比的器件，这可以通过控制制作过程的停机点来得到。

### 方向性(Directivity)

方向性也是光耦合器所特有的一个技术术语，它是衡量器件定向传输特性的参数。以标准X形耦合器为例，方向性定义为在耦合器正常工作时，输入一侧非注入光一端的输出光功率与全部注入光功率的比较值，以分贝(dB)为单位的数学表达式为：

$$DL = -10 \log \left( \frac{P_{i2}}{P_{i1}} \right)$$

其中， $P_{i1}$ 代表注入光功率， $P_{i2}$ 代表输入一侧非注入光的一端的输出光功率。

### 均匀性(Uniformity)

对于要求均匀分光的光耦合器(主要是树形和星形器件)，实际制作时，因为工艺的局限，往往不可能做到绝对的均分。均匀性就是用来衡量均分器件的“不均匀程度”的参数。它定义为在器件的工作带宽范围内，各输出端口输出光功率的最大变化量。其数学表达式为：

$$FL = -10 \log \left[ \frac{\min(P_O)}{\max(P_O)} \right]$$

## 偏振相关损耗(Polarization Dependent Loss)

偏振相关损耗是衡量器件性能对于传输光信号的偏振态的敏感程度的参量，俗称偏振灵敏度。它是指当传输光信号的偏振态发生 $360^\circ$ 变化时，器件各输出端口输出光功率的最大变化量：

$$PDL_i = -10 \log \left[ \frac{\min(P_{O_i})}{\max(P_{O_i})} \right]$$

在实际应用中，光信号偏振态的变化是经常发生的，因此，往往要求器件有足够小的偏振相关损耗，否则将直接影响器件的使用效果。

## 隔离度(Isolation)

隔离度是指光纤耦合器件的某一光路对其他光路中的光信号的隔离能力。隔离度高，也就意味着线路之间的“串话”(crosstalk)小。对于光纤耦合器来说，隔离度更有意义的是用于反映波分复用器件对不同波长信号的分离能力。其数学表达式是：

$$I = -10 \log \left( \frac{P_t}{P_i} \right)$$

式中： $P_i$ 是某一光路输出端测到的其他光路信号的功率值； $P_t$ 是被检测光信号的输入功率值。

从上述定义可知，隔离度对于分波耦合器的意义更为重大，要求也就相应地要高些，实际工程中往往需要隔离度达到40dB以上的器件；而一般来说，合波耦合器对隔离度的要求并不苛刻，20dB左右将不会给实际应用带来明显不利的影响。

## 2.3 波分复用与解复用器

波分复用 / 解复用器是一种特殊的耦合器，是构成波分复用多信道光波系统的关键器件，其功能是将若干路不同波长的信号复合后送入同一根光纤中传送，或将在同一根光纤中传送的多波长光信号分解后分送给不同的接收机，对利用光纤频带资源，扩展通信系统容量具有重要意义。WDM器件有多种类型，如熔锥型、光栅型、干涉滤波器型和集成光波导型。

## 光隔离器

在光纤与半导体激光器的耦合系统中，某些不连续处的反射将影响激光器工作的稳定性。这在高码速光纤通信系统，相干光纤通信系统，频分复用光纤通信系统，光纤CATV传输系统以及精密光学测量系统中将带来有害的影响。为了消除这些影响，需要在激光器与光纤之间加光隔离器。光隔离器是一种只允许光线沿光路正向传输的非互易性元件，其工作原理主要是利用磁光晶体的法拉第效应，它由两个线偏振器中间加一法拉第旋转器而成。

## 光开关

光开关是一种具有一个或多个可选择的传输端口，可对光传输线路或集成光路中的光信号进行相互转换或逻辑操作的器件。端口即指连接于光器件中允许光输入或输出的光纤或光纤连接器。光开关可用于光纤通信系统、光纤网络系统、光纤测量系统或仪器以及光纤传感系统，起到开关切换作用。

根据其工作原理，光开关可分为机械式和非机械式两大类。机械式光开关靠光纤或光学元件移动，使光路发生改变。它的优点是：插入损耗较低，一般不大于2dB；隔离度高，一般大于45dB；不受偏振和波长的影响。不足之处是：开关时间较长，一般为毫秒数量级，有的还存在回跳抖动和重复性较差的问题。机械式光开关又可细分为移动光纤、移动套管、移动准直器、移动反光镜、移动棱镜、移动耦合器等种类。非机械式光开关则依靠电光效应、磁光效应、声光效应以及热光效应来改变波导折射率，使光路发生改变，它是近年来非常热门的研究课题。这类开关的优点是：开关时间短，达到微秒数量级甚至更低；体积小，便于光集成或光电集成。不足之处是插入损耗大，隔离度低，只有20dB左右。

光开关在光学性能方面的特性参数主要有插入损耗、回波损耗、隔离度、远端串扰、近端串扰、工作波长、消光比、开关时间等。

**插入损耗** 定义为输入和输出端口之间光功率的减少，以分贝来表示。

$$I_L = -10 \log(P_1/P_0)$$

式中： $P_0$ 为进入输入端的光功率； $P_1$ 为输出端接收的光功率。插入损耗与开关的状态有关。

**回波损耗** 回波损耗(也称为反射损耗或反射率), 定义为从输入端返回的光功率与输入光功率的比值, 以分贝表示。

$$R_L = -10 \log(P_1/P_0)$$

式中:  $P_0$ 为进入输入端的光功率;  $P_1$ 为在输入端口接收到的返回光功率。回波损耗也与开关的状态有关。

**隔离度** 隔离度定义为两个相隔离输出端口光功率的比值, 以分贝来表示。

$$I_{n,m} = -10 \log(P_{in}/P_{im})$$

式中:  $n$ 、 $m$ 为开关的两个隔离端口( $n \neq m$ );  $P_{in}$ 是光从 $i$ 端口输入时 $n$ 端口的输出光功率,  $P_{im}$ 是光从 $i$ 端口输入时在 $m$ 端口测得的光功率。

**远端串扰** 远端串扰定义为光开关的接通端口的输出光功率与串入另一端口的输出光功率的比值。

$$FC_{12} = -10 \log(P_1/P_2)$$

式中:  $P_1$ 是从端口1输出的光功率;  $P_2$ 是从端口2输出的光功率。

**近端串扰** 近端串扰定义为当其它端口接终端匹配时, 连接的端口与另一个名义上是隔离的端口的光功率之比。

$$NC_{12} = -10 \log(P_2/P_1)$$

式中:  $P_1$ 是输入到端口1的光功率,  $P_2$ 是端口2接收到的光功率。

**消光比** 消光比定义为两个端口处于导通和非导通状态的插入损耗之差。

$$ER_{nm} = IL_{nm} - IL_{nm}^0$$

式中:  $IL_{nm}$ 为 $n,m$ 端口导通时的插入损耗;  $IL_{nm}^0$ 为非导通状态的插入损耗。

**开关时间** 开关时间指开关端口从某一初始态转为通或断所需的时间, 开关时间从在开关上施加或撤去转换能量的时刻起测量。

## 2.4 光纤时域反射测量

光纤时域反射测量 (Optical fiber Time-domain Reflectometry, 简称OTDR) 是光纤通信领域非常重要的测量技术。OTDR首先发射光脉冲进入光纤, 光脉冲在光纤内传输时, 会由于光纤本身的性质、连接器、接合点、弯曲或其它类似的事件而产生散射和反射, 通过对返回光的强度及时间特征进行分析可以测知光纤介质的传输特性。图 5.2是OTDR典型的测试波形。

OTDR使用瑞利散射和菲涅尔反射来表征光纤的特性。瑞利散射是由于光信号沿着光纤产生无规律的散射而形成, 这些背向散射信号表明了光纤导致的衰减 (损耗/距离) 程度, 形成的轨迹是一条向下的曲线。给定光纤参数和波长, 瑞利散射的功率与信号的脉冲宽度成比例, 脉冲宽度越长, 背向散射功率就越强。瑞利散射的功率还与发射信号的波长有关, 波长较短则功率较强。在高波长区 (超过1500nm), 瑞利散射会持续减小, 但红外吸收的现象会出现, 增加并导致了全部衰减值的增大。1550nm波长的OTDR具有最低的衰减性能, 可以进行长距离的测试, 高衰减的1310nm或1625nm波长, OTDR的测试距离受到限制。

菲涅尔反射是离散的反射, 它是由整条光纤中的个别点而引起的, 这些点是由造成反射系数改变的因素, 例如玻璃与空气的间隙。在这些点上, 会有很强的背向散射光被反射回来。OTDR利用菲涅尔反射的信息来定位连接点, 光纤终端或断点, 通过发射信号到返回信号所用的时间以及光在玻璃物质中的速度, 可以计算出距离。

## 三 实验装置与实验内容

本实验要求正确搭建光路, 测量并计算出不同耦合器 (每个实验平台所提供的数个耦合器) 的特征参数 (按照前面实验原理部分所定义的方法)。注意, 使用光纤跳线连接时, 应非常小心谨慎的连接, 不应弄脏、弄坏光纤跳线的接头。

### 3.1 光纤耦合参数测定

#### 实验光路

实验光路如图5.3和图5.4所示。



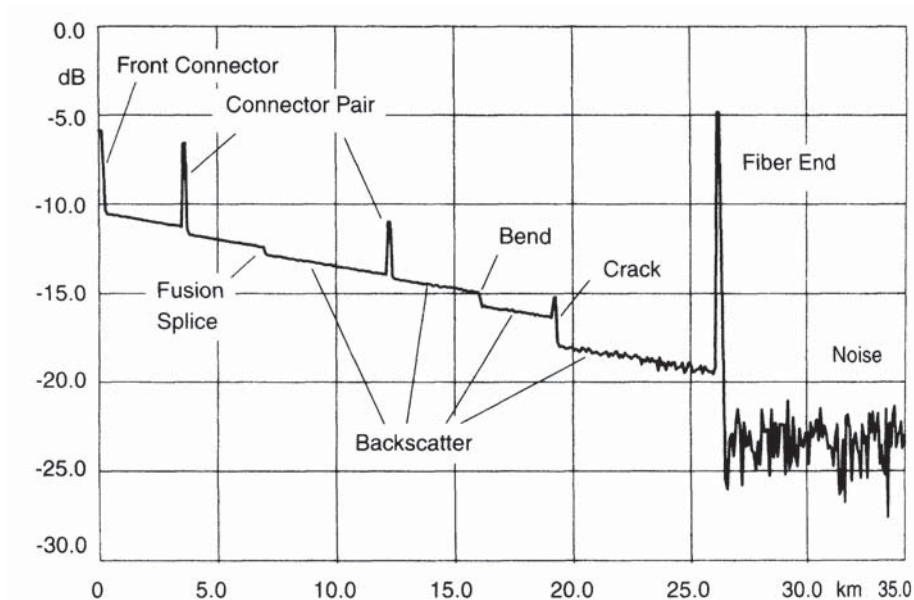


图 5.2: 光纤时域反射测量测试波形

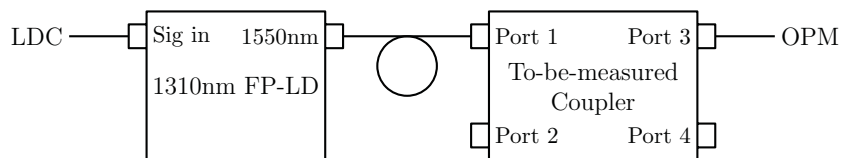


图 5.3: 实验装置图一。

## 操作内容与步骤

### 1. 测试光路准备

- (a) 按实验装置图 5.3 所示结构连接 1550nm 半导体激光器、单模光纤耦合器、InGaAs PIN 和主机，暂将 1550nm 半导体激光器输出直接连接至 OPM 输入端，检查无误后打开电源。
  - (b) 设置 OPM 工作模式为 mW (dBm)，量程 (RTO) 切换至 0dBm。
  - (c) 设置 LD1 工作模式 (MOD) 为恒流驱动 (ACC)，1550nm 激光器为恒定电流工作模式，调节驱动电流 ( $I_c$ ) 至输出功率为 -7.0dBm (0.2mW) 附近，记录光功率值  $P_i$ 。
  - (d) 连接 1550nm 激光器输出 (1550nm Out) 至待测光纤耦合器输入端 (PORT1)。
2. 连接待测光纤耦合器输出端 PORT3 至主机的 OPM 的输入端，记录该端口输出光功率  $P_{O1}$ ，计算光纤耦合器插入损耗  $IL_1$ 。
  3. 绕轴向缓慢旋转待测光纤耦合器输入端光纤，记录该端口输出光功率  $P_{O1}$  的最小值  $\text{Min}(P_{O1_{\min}})$  和最大值  $\text{Max}(P_{O1_{\max}})$ ，计算光纤耦合器偏振依赖损耗  $PDL_1$ 。
  4. 连接待测光纤耦合器输出端 PORT4 至主机的 OPM 输入端，记录该端口输出光功率  $P_{O2}$ ，计算光纤耦合器插入损耗  $IL_2$ 。
  5. 绕轴向缓慢旋转待测光纤耦合器输入端光纤，记录该端口输出光功率  $P_{O2}$  的最小值  $P_{O2_{\min}}$  和最大值  $P_{O2_{\max}}$ ，计算光纤耦合器偏振依赖损耗  $PDL_2$ 。
  6. 计算光纤耦合器分光比 CR，以及光纤耦合器附加损耗 EL。
  7. 按实验装置图 5.4 所示结构将待测光纤耦合器输入端 PORT2 连接至 OPM 输入端。待测光纤耦合器输出端 PORT3 和 PORT4 分别连接一根光跳线，每根光跳线均在手指上绕 5 圈，使得 PORT3 和 PORT4 的输出光功率在两跳线中极大衰减，最终减小其反射光对方向性测量的影响。设置 OPM 至合适量程 (RTO)，记录该端口反向输出光功率  $P_{i2}$ ，计算光纤耦合器方向性 DL。

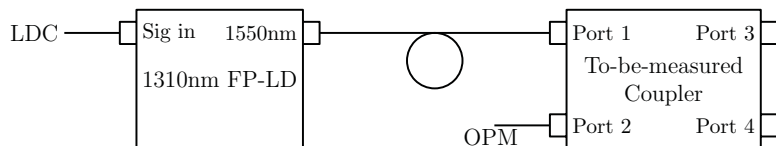


图 5.4: 实验装置图二。

### 3.2 时域反射测量

本实验要求正确搭建光路，测量出光路中不同反射点的回波信号（利用示波器）。然后根据测量结果，计算出光纤长度；并与所标出的光纤长度相比较，计算测量误差。

#### 光纤时域反射实验装置图

实验光路如图5.5所示。

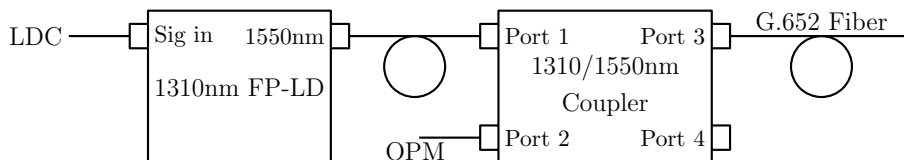


图 5.5: 光纤时域反射测量实验装置。

#### 操作步骤

##### 1. 准备操作：

- 按图 5.5所示结构连接1550nm半导体激光器、InGaAs PIN光电二极管、单模光纤耦合器、待测G.652单模光纤和主机。
- 将单模光纤耦合器输出端PORT4连接一根FC/APC-FC/PC光跳线，将待测G.652单模光纤末端连接一根FC/APC-PC光跳线。
- 将函数信号发生器输出（SIG）连接至半导体激光控制器LD2的调制信号输入端(LDC.MOD)，同时使用三通将此信号连接至示波器的CH2输入用于信号同步。
- 将光电信号检测器PD的监控输出信号(PD.OUT)连接至示波器的CH1输入，检查无误后打开系统电源。

##### 2. 时域反射法测定单模光纤断点位置：

- 设置PD量程（RTO）至100 $\mu$ A档。
- 设置SIG工作模式为脉冲模式(PUS)，输出信号幅度Vs调至5.0V。调节示波器同步CH1输入，上升沿出发，观察到稳定的脉冲调制信号。
- 设置LD2工作模式（MOD）为数字调制模式（ODM），1550nm激光器工作于5kHz脉冲模式下，调节LD2驱动电流（Ic）至40.0mA。
- 观察光接收机监控信号波形，记录两次反射脉冲前沿之间的时间间隔 $\Delta t$ 。
- 计算单模光纤断点位置，假设光纤芯的折射率为 $n = 1.46$ 。

## 四 思考题

实验完成后，请思考并回答下面的问题：

- 光纤连接器有哪些类型，分别具有什么特性？
- 如何借助于标准3dB耦合器测量待测光纤耦合器输入端PORT1的回波损耗？请画出测试光路，并写出测试步骤和数据处理方法。
- 阐述光纤时域反射测量的原理，以及如何用该方法测量光纤中某未知断点的具体位置。