

# 光纤传感综合实验

## 讲义

大恒新纪元科技股份有限公司

版权所有 不得翻印

## 目录

前 言 .....	2
实验一 LD 光源的 P-I 特性曲线 .....	3
实验二 透射式横(纵)向光纤位移传感 .....	5
实验三 反射式光纤位移传感.....	9
实验四 微弯光纤位移传感 .....	12
实验五 光纤温度传感实验 .....	15
实验六 光纤电压传感实验 .....	20
实验七 光纤电流传感实验 .....	24

## 前 言

光纤是 20 世纪 70 年代的重要发明之一，它与激光器、半导体探测器一起构成了新的光学技术，创造了光电子学的新天地。光纤的出现产生了光纤通信技术，而光纤传感技术是伴随着光通信技术的发展而逐步形成的。在光通信系统中，光纤被用作远距离传输光波信号的媒质，显然，在这类应用中，光纤传输的光信号受外界干扰越小越好。但是，在实际的光传输过程中，光纤易受外界环境因素影响，如温度，压力，电磁场等外界条件的变化将引起光纤光波参数如光强，相位，频率，偏振，波长等的变化。因而，人们发现如果能测出光波参数的变化，就可以知道导致光波参数变化的各种物理量的大小，于是产生了光纤传感技术。

光纤传感器始于 1977 年，与传统的各类传感器相比有一系列的优点，如灵敏度高，抗电磁干扰，耐腐蚀，电绝缘性好，防爆，光路有挠曲性，便于与计算机联接，结构简单，体积小，重量轻，耗电少等。

光纤传感器按传感原理可分为功能型和非功能型。功能型光纤传感器是利用光纤本身的特性把光纤作为敏感元件，所以也称为传感型光纤传感器，或全光纤传感器。非功能型光纤传感器是利用其它敏感元件感受被测量的变化，光纤仅作为传输介质，传输来自远外或难以接近场所的光信号，所以也称为传光型传感器，或混合型传感器。

光纤传感器按被调制的光波参数不同又可分为强度调制光纤传感器，相位调制光纤传感器，频率调制光纤传感器，偏振调制光纤传感器和波长(颜色)调制光纤传感器。

光纤传感器按被测对象的不同，又可分为光纤温度传感器，光纤位移传感器，光纤浓度传感器，光纤电流传感器，光纤流速传感器，光纤液位传感器等。

光纤传感器可以探测的物理量很多，已实现的光纤传感器物理量测量达 70 余种。然而，无论是探测哪种物理量，其工作原理无非都是用被测量的变化调制传输光波波的某一参数，使其随之变化，然后对已调制的光信号进行检测，从而得到被测量。因此，光调制技术光纤传感器的核心技术。

鉴于以上专业背景，我们开发并研制出了光纤传感实验系统。本实验系统的开放性，分立式可以增强学生对光纤传感的感性认识，提高学生的基本技能。在实验教学过程中，从实验原理，实验内容到实验仪器，实验方法等都很适合工科物理实验的教学要求，将应用技术和基础实验很好的结合起来。

本手册仅供使用光纤传感实验系统从事物理实验以及光纤传感应用的教师，学生和技术人员参考。限于作者水平，手册中谬误难免，恳请读者不吝批评指正。衷心希望在我们的共同努力下，能够推进光纤传感这一先进技术的学习和普及。

## 实验一 LD 光源的 P-I 特性曲线

### 一、引言

LD (Laser Diode), 激光二极管, 简称 LD, 利用光学谐振腔, 使光子在平行的镜面间不断地来回反射, 每反射一次能量便得到进一步的放大, 反复重复, 就使得受激辐射趋于占压倒的优势, 即在垂直于反射面的方向上形成激光输出。

### 二、实验目的

- 1、了解 LD 光源发光机理
- 2、掌握 LD 的测试方法, 绘制激光功率随电流的变化曲线

### 三、基本原理

#### 1、LD 工作介绍

从激光物理学中知道, 半导体激光器的粒子数反转分布是指载流子的反转分布。正常条件下, 电子总是从低能态的价带填充起, 填满价带后才能填充到高能态的导带; 而空穴则相反。如果我们用电注入等方法, 使 p-n 结附近区域形成大量的非平衡载流子, 即在小于复合寿命的时间内, 电子在导带, 空穴在价带分别达到平衡, 那么在此注入区内, 这些简并化分布的导带电子和价带空穴就处于相对反转分布, 称之为载流子反转分布。注入区称为载流子分布反转区或作用区。

结型半导体激光器通常用与 p-n 结平面相垂直的一对相互平行的自然解理面构成平面腔。在结型半导体激光器的作用区内, 开始时导带中的电子自发地跃迁到价带和空穴复合, 产生相位、方向并不相同的光子。大部分光子一旦产生便穿出 p-n 结区, 但也有一部分光子在 p-n 结区平面内穿行, 并行进相当长的距离, 因而它们能激发产生出许多同样的光子。这些光子在平行的镜面间不断地来回反射, 每反射一次便得到进一步的放大。这样重复和发展, 就使得受激辐射趋于占压倒的优势, 即在垂直于反射面的方向上形成激光输出。

光纤耦合技术的发展让半导体激光器的光纤输出成为可能, 特别是半导体激光器的广泛应用, 光纤输出的半导体激光器在光纤通信、光纤传感等方面也广泛应用。

#### 2、LD 光源的 P-I 特性测试

在结构上, 由于 LD 与 LED 相比有光学谐振腔。因此, LD 和 LED 的照度与电流的 P-I 关系特性曲线则有很大的差别。LED 的 P-I 曲线基本上是一条近似的线性直线, 只有当电流过大时, 由于 PN 结发热产生饱和现象, 使 P-I 曲线的斜率减小。

对于半导体激光器来说, 当正向注入电流较低时, 增益小于 0, 此时半导体激光器只能发射荧光; 随着电流的增大, 注入的非平衡载流子增多, 使增益大于 0, 但尚未克服损耗, 在腔内无法建立起一定模式的振荡, 这种情况被称为超辐射; 当注入电流增大到某一数值时, 增益大于损耗, 半导体激光器输出激光, 此时的注入电流值定义为阈值电流  $I_{th}$ 。

四、实验内容

1、光路部分

(1) 如图 1 所示，P-I 测试光路包含三个部分，左边是光源（功率 2.5mw，波长 650nm，）右边是功率计，中间是多模光纤（纤芯 62.5um，透射式光纤，短头接光源，长头接功率计，不要接反）。

(2) 打开电源开关，并按下“active”，光源工作，如果显示屏电流不为 0（一般最小为 0 或者 1mA），需要将电位器逆时针调到最小。

(3) 打开功率计开关，选择 20uW 测量，在没有打开光源或者光源电流最小时调零。

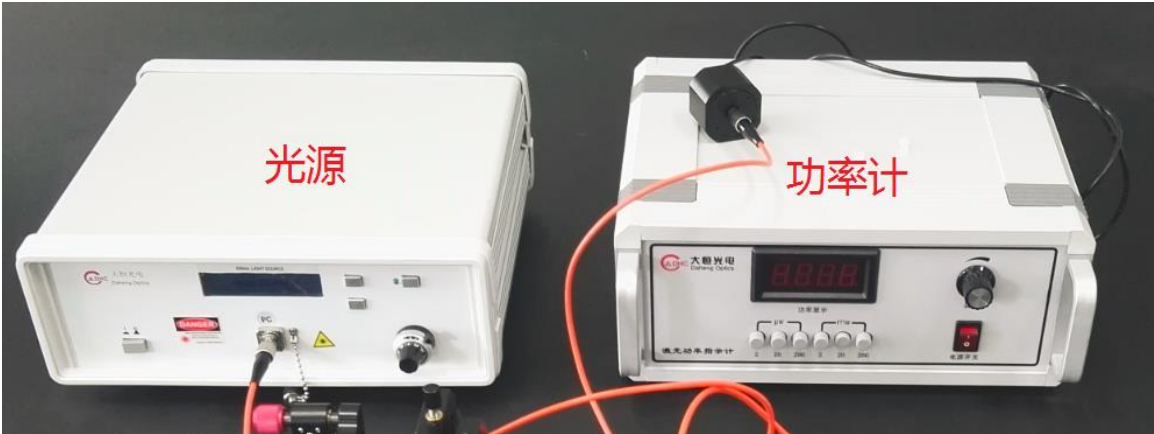


图 1 P-I 测试示意图

2、数据记录及分析

(1) 逐渐旋转光纤光源的电流调整旋钮，每隔 1mA 记录下功率计的数值，完成下表（注意如果最大值电流为 35mA，建议测试之后减小 2-3mA，避免长时间最大负荷工作）：

电流（mA）	1	2	3	4	5	6	.....	35
功率（mW）							.....	

2、通过数据绘制 P—I 曲线，确定阈值电流。

## 实验二 透射式横(纵)向光纤位移传感

### 一、引言

透射式光纤位移传感是一种强度型光纤传感，实验通过改变两透射多模光纤出光芯径的相对位置（横向或者纵向）观测传输功率的变化，从而绘制功率随横向或纵向位移的关系曲线。

### 二、实验目的

- 1、了解强度型光纤传感的基本原理
- 2、掌握透射式光纤位移传感的测试方法，记录并分析相关数据

### 三、基本原理

#### 1、多模光纤输出光强分布

强度调制光纤传感器的基本原理是待测物理量引起光纤中的传输光光强变化，通过检测光强的变化实现对待测量的测量，其原理如图 1 所示。

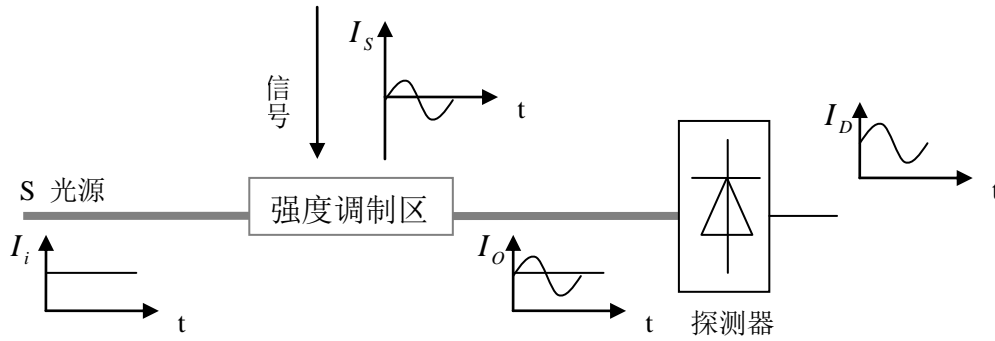


图 1 强度调制光纤传感器的基本原理示意图

对于多模光纤来说，光纤端出射光场的场强分布由下式给出

$$\phi(r, z) = \frac{I_0}{\pi \sigma^2 a_0^2 [1 + \xi(z/a_0)^{3/2}]^2} \exp \left\{ -\frac{r^2}{\sigma^2 a_0^2 [1 + \xi(z/a_0)^{3/2}]^2} \right\}$$

式中  $I_0$  为由光源耦合入发射光纤中的光强； $\phi(r, z)$  为纤端光场中位置  $(r, z)$  处的光通量密度； $\sigma$  为一表征光纤折射率分布的相关参数，对于阶跃折射率光纤， $\sigma=1$ ； $r$  为偏离光纤轴线的距离， $z$  为离发射光纤端面的距离， $a_0$  为光纤芯半径， $\xi$  为与光源种类、光纤数值孔径及光源与光纤耦合情况有关的综合调制参数。

如果将同种光纤置于发上发射光纤出射光场中作为探测接收器时，所接收到的光强可表示为：

$$I(r, z) = \iint_S \phi(r, z) ds = \iint_S \frac{I_0}{\pi \omega^2(z)} \exp\left\{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right\} ds$$

式中  $\omega(z) = \sigma a_0 [1 + \xi(z/a_0)^{3/2}]$ ，这里，S 为接收光面，即纤芯端面。

在光纤端出射光场的远场区，为简便计算，可用接收光纤端面中心点处的光强来作为整个纤芯面上的平均光强，在这种近似下，得在接收光纤终端所探测到的光强公式为：

$$I(r, z) = \frac{SI_0}{\pi \omega^2(z)} \exp\left\{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right\}$$

## 2、透射式强度调制

透射式强度调制光纤传感原理如下图所示，调制处的光纤端面为平面，通常入射光纤不动，而接收光纤可以作纵(横)向位移，这样，接收光纤的输出光强被其位移调制。

透射式调制方式的分析比较简单。在发送光纤端，其光场分布为一立体光锥，各点的光通量由函数  $\phi(r, z)$  来描述，其光场分布坐标如图所示。当 z 固定时，得到的是横向位移传感特性函数，当 r 取定时(如  $r=0$ )，则可得到纵向位移传感特性函数。

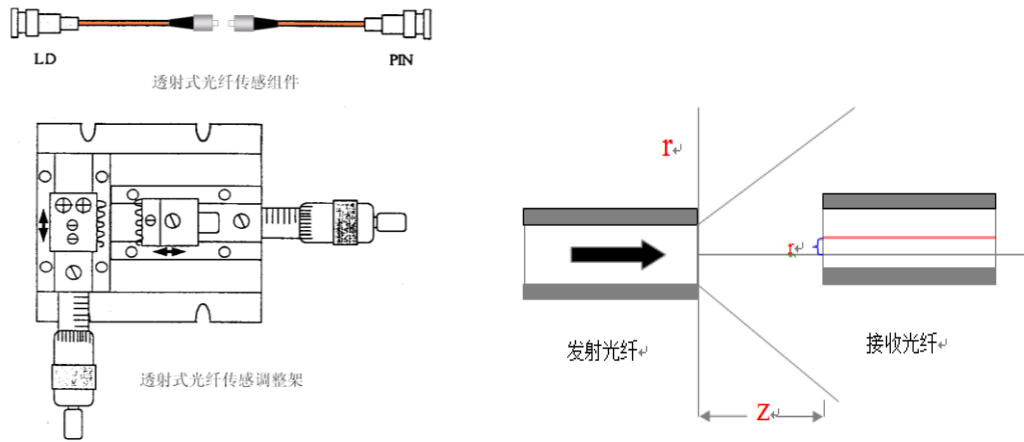


图 2 透射光纤传感示意图

调制处的光纤端面为平面，通常发射光纤不动，而接收光纤可以做横向位移，纵向位移。这样，接收光纤的输出光强被其位移调制。这里采用发射光纤不动，接收光纤移动的办法，实现光纤被横向位移和纵向位移调制。

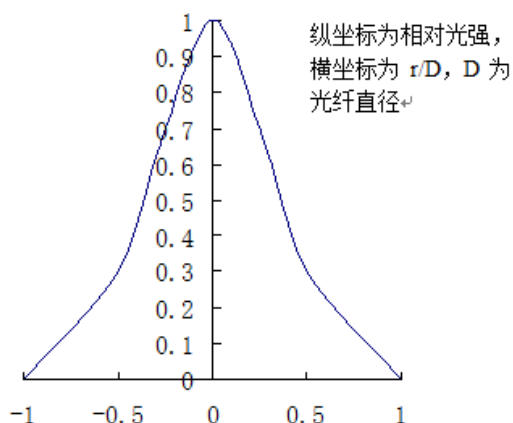


图 3 功率随横向位移变化示意图

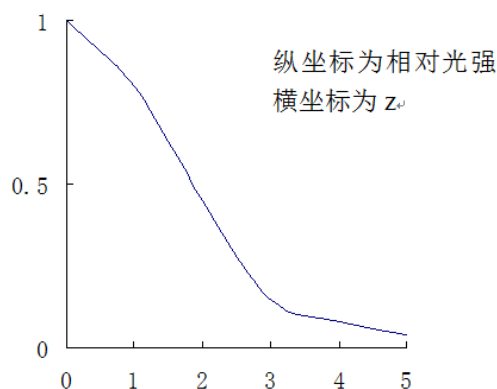


图 4 功率随纵向位移变化示意图

#### 四、实验内容

##### 1、光路部分

(1) 如图 5 所示，测试光路包含三个部分，左边是光源（功率 2.5mw，波长 650nm，）右边是功率计，前面是透射传感测试主体，这部分是在导轨上固定透射光纤（两个透射光纤纤芯 62.5um），连接时注意两光纤的短头分别接光源和功率计，长头接固定架子。

(2) 打开电源开关，并按下“active”，光源工作，需要将电位器顺时针旋转到较大位置（比最大电流略小 2mA）。

(3) 打开功率计开关，选择 20uW 测量，在没有打开光源或者光源电流最小时调零。

(4) 逐渐靠近光纤 A 和光纤 B，调节光纤 B 的位置（四维调整架的二维平移调整）与光纤 A 目视高度一致并紧密靠近，此时功率计上可看到示数变化。

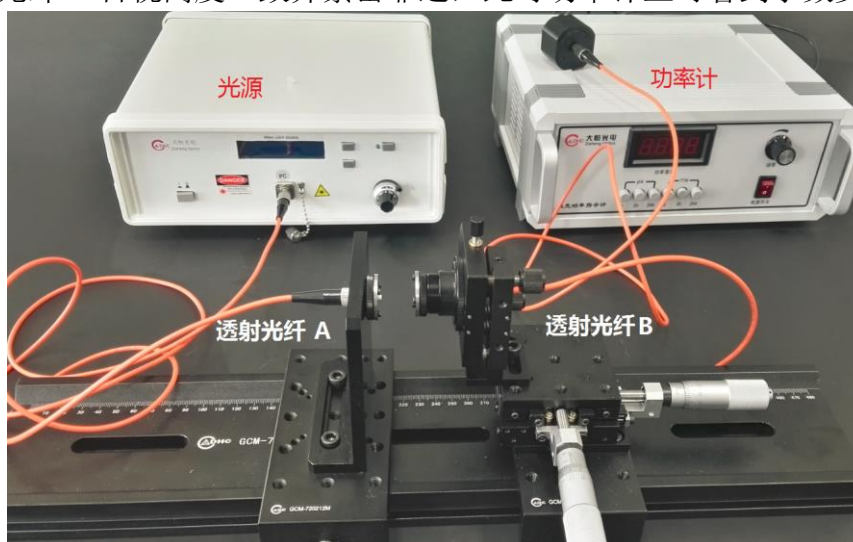


图 5 透射光纤传感实验光路

##### 2、数据记录及分析

(1) 调整精密平移台的横向和纵向丝杆以及四维镜架的上下和俯仰旋钮，同时观察功率计的示数变化，待功率计示数最大时记下平移台的横向和纵向读数，即初始位置。



(2) 完成横向位移传感实验数据表格（可考虑每隔 0.01mm），绘制变化曲线。

横向位移读数(mm)	X0	X1				Xn
位移变化量(mm)	X0-X0	X1-X0				Xn-X0
功率（uW）						

(3) 完成纵向位移传感实验数据表格（可考虑每隔 0.05mm），绘制变化曲线。

纵向位移读数(mm)	X0	X1				Xn
位移变化量(mm)	X0-X0	X1-X0				Xn-X0
功率（uW）						

## 实验三 反射式光纤位移传感

### 一、引言

反射式光纤位移传感是一种强度型光纤传感，实验通过 Y 型光纤，一路入射，一路出射，通过改变与反射镜之间的距离（纵向）观测传输功率的变化，从而绘制功率随纵向位移的关系曲线。

### 二、实验目的

- 1、了解强度型光纤传感的基本原理
- 2、掌握反射式光纤位移传感的测试方法，记录并分析相关数据

### 三、基本原理

使用光纤传感实验系统，可以构成反射式光纤位移传感器，对微小位移量进行测量。反射式光纤传感实验的光纤探头 A 由两根光纤组成，一根用于发射光，一根用于接收反射回来的光，R 是反射材料的反射率。由发射光纤发出的光照射到反射材料上，通过检测反射光的强度变化，就能测出反射体的位移。采用的光纤传感器的原理如图所示。光纤探头 A 由两根光纤组成，一根用于发射光，一根用于接收反射回的光，R 是反射材料。系统可工作在两个区域中，前沿工作区和后沿工作区（见反射式调制特性曲线）。当在后沿区域中工作时，可以获得较宽的动态范围。

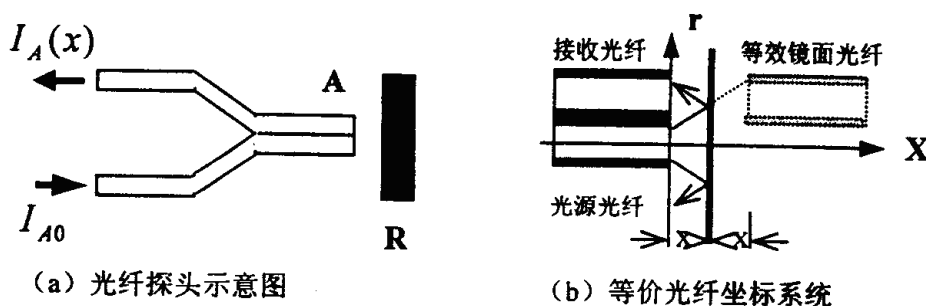


图 1 反射式光纤传感原理图

就外部调制非功能型光纤传感器而言，其光强响应特性曲线是这类传感器的设计依据。该特性调制函数可借助于光纤端出射光场的场强分布函数给出：

$$\phi(r, x) = \frac{I_0}{\pi \sigma^2 a_0^2 [1 + \xi(x/a_0)^{3/2}]^2} \exp \left\{ -\frac{r^2}{\sigma^2 a_0^2 [1 + \xi(x/a_0)^{3/2}]^2} \right\}$$

式中  $I_0$  为由光源耦合入发射光纤中的光强； $\phi(r, x)$  为纤端光场中位置  $(r, x)$  处的光通量密度； $\sigma$  为一表征光纤折射率分布的相关参数，对于阶跃折射率光纤， $\sigma=1$ ； $r$  为偏离光纤轴线的距离， $x$  为光纤端面与反射面的距离， $a_0$  为光纤芯半

径， $\xi$  为 与光源种类、光纤数值孔径及光源与光纤耦合情况有关的综合调制参数。

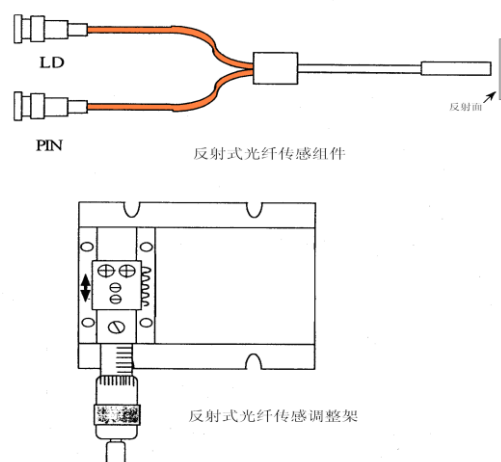


图 2 反射式光纤位移示意图

如果将同种光纤置于发上发射光纤出射光场中作为探测接收器时，所接收到的光强可表示为：

$$I(r, x) = \iint_S \phi(r, x) ds = \iint_S \frac{I_0}{\pi \omega^2(x)} \exp\left\{-\frac{r^2}{\omega^2(x)}\right\} ds$$

式中  $\omega(x) = \sigma a_0 [1 + \xi(x/a_0)^{3/2}]$ ，这里，S 为接收光面，即纤芯端面。

在纤端出射光场的远场区，为简便计算，可用接收光纤端面中心点处的光强来作为整个纤芯面上的平均光强，在这种近似下，得在接收光纤终端所探测到的光强公式为：

$$I_A(x) = \frac{RSI_0}{\pi \omega^2(2x)} \exp\left\{-\frac{r^2}{\omega^2(2x)}\right\}$$

理论曲线

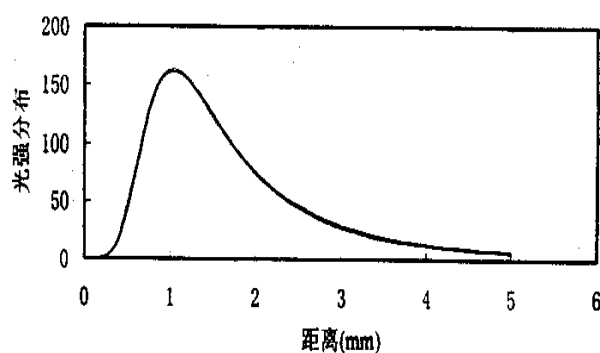


图 3 反射式调制特性曲线

## 四、实验内容

### 1、光路部分

(1) 如图 4 所示，测试光路包含三个部分，左边是**光源**（功率 2.5mw，波长 650nm，）右边是**功率计**，前面是**反射传感测试主体**，这部分是在导轨上固定**反射光纤**（反射光纤纤芯 62.5um）和反射镜（直径 25.4mm），连接时注意反射光纤头不要触碰反射镜或其他物体，以免损坏。两光纤的头分别接光源和功率计，反射头固定夹持架上。

(2) 打开电源开关，并按下“active”，光源工作，需要将电位器顺时针旋转到较大位置（比最大电流略小 2mA）。

(3) 打开功率计开关，选择 20uW 测量，在没有打开光源或者光源电流最小时调零。

(4) 逐渐将 Y 型光纤出射端和反射镜靠近（光纤输出端不要与反射镜接触），靠近过程中会出现功率最大值，在此状态下，调整调节 Y 型光纤的姿态（四维调整架的二维俯仰旋钮）和反射镜的反射角度使功率计示数最大，然后移动平移台继续靠近反射镜，直至示数最小（此时已经非常靠近反射镜，但不要接触）。

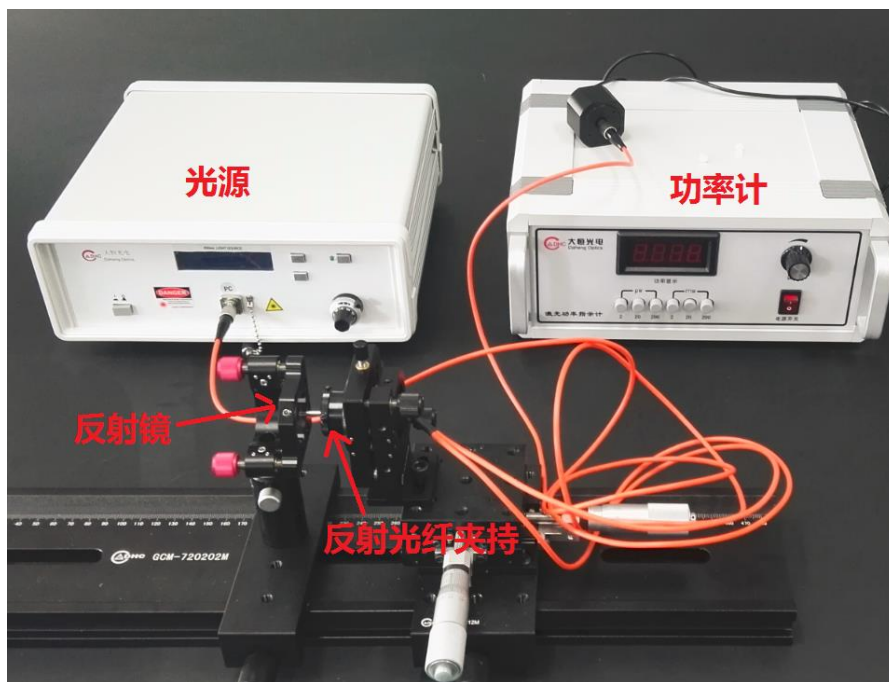


图 4 反射式光纤传感实物图

### 2、数据记录及分析

(1) 找到功率为最小但没有接触的位置即为零位置，然后逐渐远离反射镜，完成反射位移传感实验数据表格（可考虑每隔 0.05mm），绘制变化曲线。

纵向丝杆读数(mm)	X0	X1				Xn
位移变化量(mm)	X0-X0	X1-X0				Xn-X0
功率 (uW)						

## 实验四 微弯光纤位移传感

### 一、引言

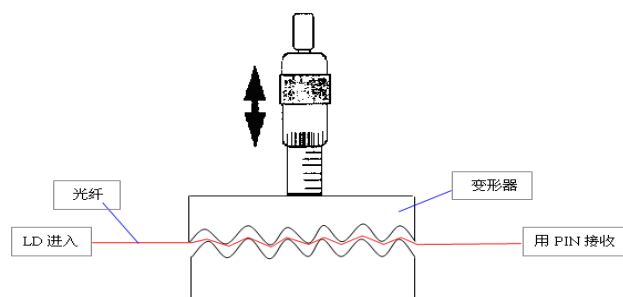
微弯光纤位移传感是一种强度型光纤传感，实验通过检测光纤变形的程度观测传输功率的变化，从而绘制功率随纵向位移的关系曲线。

### 二、实验目的

- 1、了解强度型光纤传感的基本原理
- 2、掌握微弯光纤位移传感的测试方法，记录并分析相关数据

### 三、基本原理

微弯型光纤传感器的原理结构如下图所示。当光纤发生弯曲时，由于其全反射条件被破坏，纤芯中传播的某些模式光束进入包层，造成光纤中的能量损耗。



微弯传感组件及调整架

为了扩大这种效应，我们把光纤夹持在一个周期波长为  $A$  的梳状结构中。当梳状结构（变形器）受力时，光纤的弯曲情况将发生变化，于是纤芯中跑到包层中的光能（即损耗）也将发生变化，近似的将把光纤看成是正弦微弯，其弯曲函数为：

$$f(z) = \begin{cases} A \sin \omega \cdot Z & (0 \leq Z \leq L) \\ 0 & (Z < 0, Z > L) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $L$  是光纤产生微弯的区域， $A$  为其弯曲幅度， $\omega$  为空间频率，设光纤微弯变形函数的微弯周期为  $\Lambda$ ，则有  $\Lambda = 2\pi / \omega$ 。光纤由于弯曲产生的光能损耗系数是：

$$\alpha = \frac{A^2 L}{4} \left\{ \frac{\sin[(\omega - \omega_c)L/2]}{(\omega - \omega_c)L/2} + \frac{\sin[(\omega + \omega_c)L/2]}{(\omega + \omega_c)L/2} \right\} \quad (2)$$

式中  $\omega_c$  称为谐振频率。

$$\omega_c = \frac{2\pi}{A_c} = \beta - \beta' = \Delta\beta \quad (3)$$

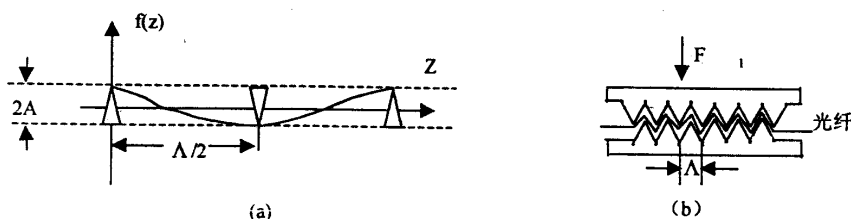


图 4 微弯型光纤传感器原理结构图

$A_c$  为谐振波长,  $\beta$  和  $\beta'$  为纤芯中两个模式的传播常数, 当  $\omega = \omega_c$  时, 这两个模式的光功率耦合特别紧, 因而损耗也增大。如果我们选择相邻的两个模式, 对光纤折射率为平方律分布的多模光纤可得:

$$\Delta\beta = \sqrt{2\Delta}/r \quad (4)$$

$r$  为光纤半径,  $\Delta$  为纤芯与包层之间的相对折射率差。由 (3) (4) 可得:

$$A_c = 2\pi r / \sqrt{2\Delta} \quad (5)$$

对于通讯光纤  $r = 25\mu m, \Delta \leq 0.01$ ,  $A_c \approx 1.1mm$ 。(2) 式表明损耗  $\alpha$  与弯曲幅度的平方成正比, 与微弯区的长度成正比。通常, 我们让光纤通过周期为  $\Lambda$  的梳状结构来产生微弯, 按 (5) 式得到的  $A_c$  一般太小, 实用上可取奇数倍, 即 3、5、7 等, 同样可得到较高的灵敏度。

## 四、实验内容

### 1、光路部分

(1) 如图 5 所示, 测试光路包含三个部分, 左边是光源 (功率 2.5mw, 波长 650nm,) 右边是功率计, 前面是微弯传感测试主体, 这部分是在导轨上固定微弯光纤 (光纤纤芯 9um)。两光纤的头分别接光源和功率计, 光纤中间部分固定在架子上, 固定好之后光纤可以活动。

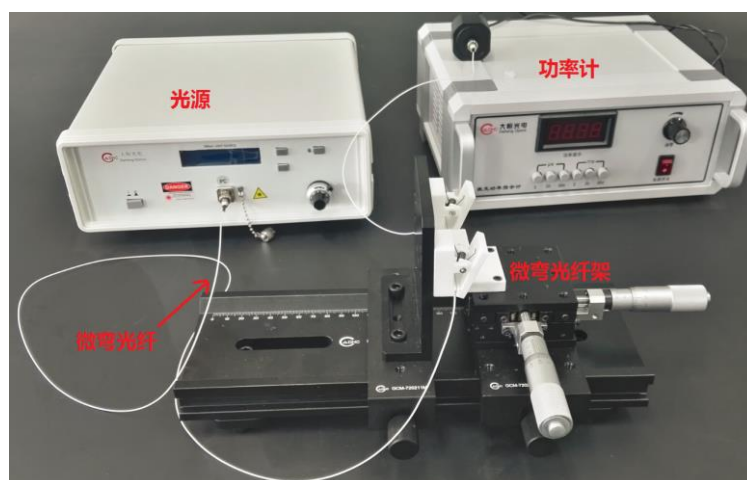


图 5 微弯光纤位移传感实物图

(2) 打开电源开关, 并按下 “active”, 光源工作, 需要将电位器顺时针旋转

到较大位置（比最大电流略小 2mA）。

（3）打开功率计开关，选择 20uW 测量，在没有打开光源或者光源电流最小时调零。

（4）光源与功率计用微弯光纤连接起来，将微弯光纤夹持在变形器上，逐渐靠近两个变形器，同时观察功率计示数，待功率计示数开始变小时固定变形器。记下此时纵向丝杆的读数。

## 2、数据记录与分析

完成微弯光纤位移传感实验数据表格（可考虑每隔 0.05mm），绘制变化曲线。

纵向丝杆读数(mm)	X0	X1				Xn
位移变化量(mm)	X0-X0	X1-X0				Xn-X0
功率（mW）						

## 实验五 光纤温度传感实验

### 一、引言

光纤传感技术用于温度测量，除了具有体积小、重量轻、电绝缘性好、柔性弯曲、耐腐蚀、灵敏度高等特点外，与传统的温度测量仪器相比，还具有响应快、频带宽、防爆、抗电磁干扰等优点，因此，光纤温度传感器是光纤传感器发展的一个重要分支。

### 二、实验目的

- 1、了解光纤温度传感的基本原理
- 2、掌握光纤温度传感的测试方法，记录并分析相关数据

### 三、基本原理

在光纤中传播的光的相位由以下3个因素决定：①光纤波导的物理长度；②光纤折射率及其分布；③光纤波导的横向几何尺寸。温度能直接改变上述三个因素的参数，产生相位变化。光纤长 $L$ ，对波长 $\lambda$ 的光波以光纤入口平面为基准测得的相位为

$$\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} = \frac{2\pi n_1 L}{\lambda_0} = k_0 n_1 L$$

式中 $\lambda_0$ 为真空中的光波长； $L$ 为光纤的长度； $n_1$ 为光纤芯的折射率； $k_0$ 为光在真空中的波数；

假设折射率分布随温度变化保持恒定，那么光纤中的相位随温度变化则表示为：

$$\Delta\phi = \Delta\phi_L + \Delta\phi_n + \Delta\phi_d$$

式中， $\Delta\phi_L$ 为光纤长度变化产生的相位变化，称为应变效应； $\Delta\phi_n$ 为光纤折射率变化产生的相位变化，称为光弹效应； $\Delta\phi_d$ 为光纤波导横向几何尺寸变化产生的相位变化，称为泊松效应。

长度变化 $\Delta L$ 时光相位变化量为：

$$\Delta\phi_L = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L$$

折射率变化 $\Delta n$ 时光相位变化量为：

$$\Delta\phi_n = \frac{2\pi}{\lambda} L \Delta n$$

光纤波导横向几何尺寸变化 $\Delta d$ 时光相位变化量为：

$$\Delta\phi_d = \frac{2\pi L}{\lambda^2} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial d} \Delta d$$

泊松效应引起的光纤直径变化所产生波导传播常数的变化很小，所以可以忽略不



计。因此相位变化为：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \left( \alpha + \frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T$$

式中， $\alpha$  为光纤线膨胀系数； $\frac{\partial n}{\partial T}$  为光纤折射率随温度变化的系数；由此看出，温度的变化引起相位的变化，通过仪器测出相位的变化就可以测出温度。

下图即为马赫-泽德尔光纤温度传感器的装置图，它由激光器、扩束器、分束器、两根长度相同的单模光纤、探测器（或者白屏）等组成。由激光器发出的光经过分束器，分成两束光，一根为参考光，一根为测量光，一般参考臂放在恒温台上，光程保持不变，而测量臂在温度的作用下，折射率和长度都发生变化，产生相位差，形成干涉。变化两者的相位差，条纹就会发生移动。相位变化一个  $2\pi$ ，条纹就会移动一条。通过干涉条纹移动的数目就可以算出温度的变化。

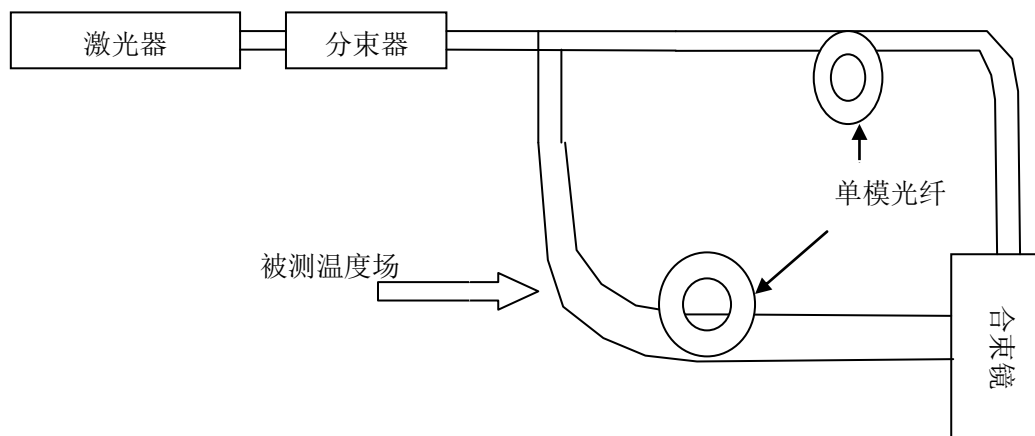


图1 光纤温度传感器结构图

M-Z 光纤温度传感器有优点也有缺点，其优点是抗干扰能力强，灵敏度高，电绝缘性好，不产生火花等；其缺点是：安装比较繁琐，光纤用的比较多，参考臂和测量臂很难安装在一起，环境的影响也比较大。

#### 四、实验内容

##### 1、光路搭建

(1) 按照下图搭建光路，依次为绿光激光器、光纤耦合器、光纤分束器、准直镜、分束棱镜、平凸透镜和白屏；

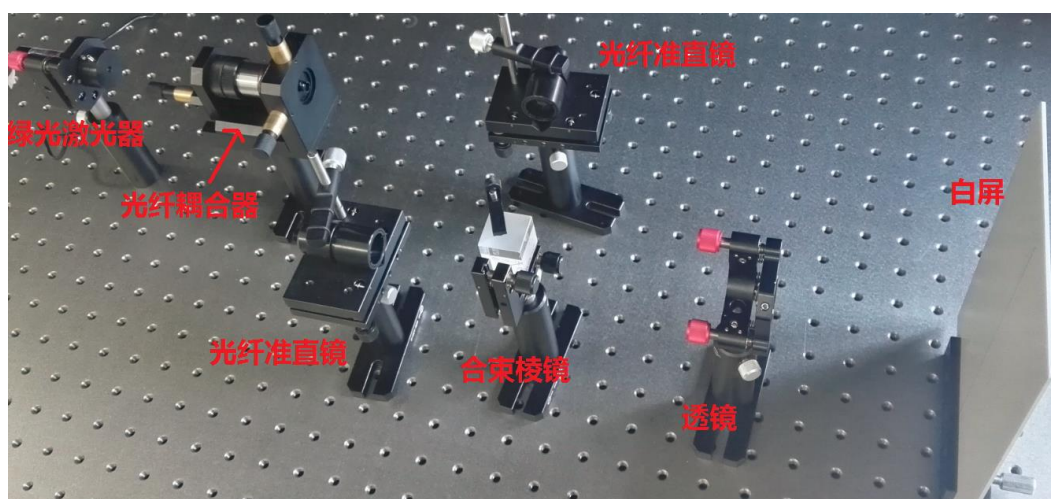


图 2 光纤温度传感实物图

(2) 调整**激光器**，如图 3 所示，打开激光器电源，可以适当调整激光器强度，开始调整激光器输出不用太强，可以在白屏上标记一点，将白屏放在激光器近处，调整激光器整体高度使激光打在标记点上，然后将白屏放在较远位置，调整激光器俯仰使激光再次打在标记点上，反复两次，激光即可水平出射。



图 3 激光调整示意图

(3) 调整**耦合器**，激光器后，放置光纤耦合器，调整耦合器位置，使出射光斑基本沿物镜中心通过，发散光斑不会被切边。

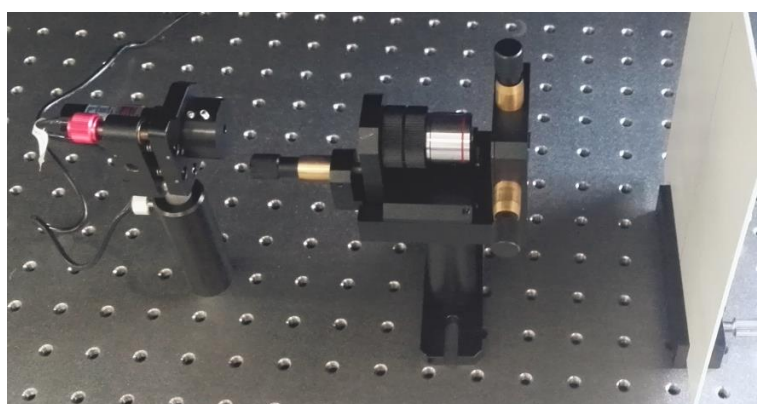


图 4 激光器耦合实物图

(4) 安装**分束器**，在耦合器后的 FC/PC 接口，安装分束器，从分束器的其中一路观察是否有绿光荧光，如果能用眼睛看到，可以一边观察出光口，一边调

整耦合器的三维螺纹副，其中靠近光纤口的两维影响光纤口的位置，对耦合影响较大，调整两维旋钮人眼感觉较强时就不要直视了，可以将输出的激光器对准白纸，然后继续调整，直至调整最强输出。

(5) 安装**准直镜**，将分束器的两路光纤，分别安装到光纤准直镜上，观察经过输出镜的光斑是否准直，如果光斑发散角度差异较大，可以松开镜头上的顶丝，轻轻旋转镜头，边旋转边观察，直至调整两束激光输出发散角相差不大即可。

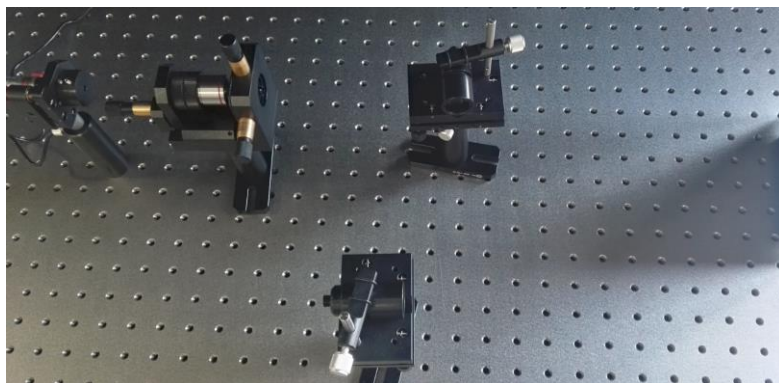


图 5 光纤耦合安装图

(6) 安装**合束棱镜**，在棱镜两侧安装两个光纤准直镜（两束激光对棱镜一束反射一束透射），首先调整被反射准直镜的位置让反射光束与透射光束在合束棱镜上重合（即两束光的位置重合），在调整合束棱镜的反射方向让两束光在远处重合，如果在 1m 左右的距离内都基本重合，那可以将凸透镜放在合束光路中。

(7) 安装**透镜**，在合束光路中安装透镜，远处放大的光斑可以看到有干涉条纹，在适当调整合束棱镜的反射角可以看到条纹疏密的变化，如图所示。

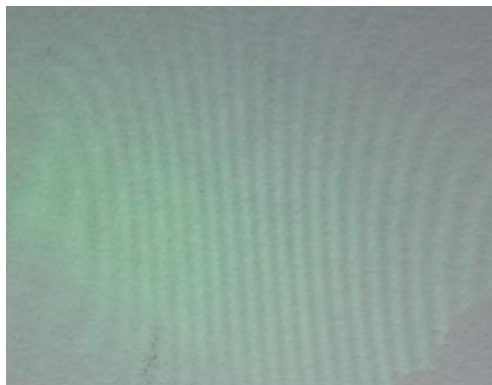


图 3 白屏上的条纹图

(7) 安装**温控台**，在分束光纤的其中一路安装温控台并将光纤固定。

(8) 如果使用 **CCD** 相机观察条纹，可以直接将 **CCD** 相机安装到透镜前面（可以去掉透镜），然后根据合束镜的俯仰调整条纹粗细。

## 2、数据记录

将温控台的温度调整到 70 度，待温度上升到 70 度时，调整目标温度为 50

度，此时每隔 0.5 度记录条纹移动的个数。

温度	70	69	68	67	66	65	64	63	62
条纹移动 个数	0	0	1	5	7	10	17	20	23

温度	61	60	59	58	57	56	55	54	53
条纹移动 调试	26	30	32	34	37	39	42	45	47

## 实验六 光纤电压传感实验

### 一、引言

与光纤电流传感器类似，光纤电压传感器作为电力系统中的重要设备，对电力系统的稳定运行和精确计量具有重要意义。它为电力系统提供用于计量、控制和继电保护所必需的信息。

## 二、实验目的

- 1、了解光纤电压传感的基本原理
- 2、掌握光纤电压传感的测试方法，记录并分析相关数据

## 三、基本原理

### 1、晶体的电光效应

光在各向同性介质中传播时， $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ 。若为  $\epsilon$  常数，光是直线前进的；若  $\epsilon = \epsilon(r)$ ，则光沿曲线前进。光在各向异性的介质中传播时， $D_i = \epsilon_0 \epsilon_{ij} E_j$ ， $\epsilon_{ij}$  为常数，将出现双折射效应。因此，光在介质中传播的规律是受介质的折射率分布所制约的，而介质的折射率分布则与介质的介电常数分布密切相关，以前认为介质的介电常数是一个物质常数，实际上外界的各种因素常常会引起  $\epsilon$  的变化，从而引起光传播的变化。

### 2、普克尔效应型光纤电压传感器

普克尔效应型光纤电压传感器是利用材料的普克尔效应来实现对高压电压进行测量的。普克尔效应是一种线性电光效应，它一般有两种：一种是外加电场平行于光的传播方向，称为纵向普克尔效应；外加电场会引起晶体的折射率改变，这反映在折射率椭球上，必然会导致椭球变形，即会使椭球方程系数发生变化，并且椭球的主轴也可能不再是原来的 X、Y、Z 了，即椭球可能发生旋转，加电场后的椭球主轴称之为感应主轴。显然，感应主轴的方向和长度与所加的电场及晶体的电光系数有关。

对于负单轴晶体 LiNbO<sub>3</sub>，未加电场时，在主轴坐标中，折射率椭球方程

$$\frac{1}{n_o^2} x^2 + \frac{1}{n_o^2} y^2 + \frac{1}{n_e^2} z^2 = 1 \quad (1)$$

对于 632.8nm 的光， $n_e=2.207$ ， $n_o=2.286$ 。

外加电场后，它的折射率椭球方程变为

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{n_o^2} - r_{22}E_y + r_{13}E_x\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{22}E_y + r_{13}E_x\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E_x\right)z^2 \\ & + 2r_{51}E_y yz + 2r_{51}E_x zx - 2r_{22}E_x xy = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $r_{ij}$  为非线性电光稀疏，对于 LiNbO<sub>3</sub> 晶体，以 10<sup>-10</sup>cm/v 为单位，则  $r_{13}=8.6$ ， $r_{33}=30.8$ ， $r_{51}=r_{63}=28$ ， $r_{22}=3.4$ 。

可见，在不同方向上加电场可得到不同形状、大小、取向的折射率椭球。一般在 LiNbO<sub>3</sub> 晶体工作在 x(或 y)向加电场的横向运转方式，即电场方向平行于 x 轴(或 y 轴)，通光方向为 z 轴方向。

若 x 向加电场，即  $E_x \neq 0, E_y = E_z = 0$ ，则(2)式变为：

$$\frac{1}{n_o^2} x^2 + \frac{1}{n_o^2} y^2 + \frac{1}{n_e^2} z^2 + 2r_{51}E_x zx - 2r_{22}E_x xy = 1 \quad (3)$$

为了找出感应主轴的方向和长度，必须进行坐标变换，即将(3)式所代表的椭球变换到主轴坐标系中，变换到主轴坐标系后，椭球方程的交叉项系数必等于0，经过这样的处理后得到：感应主轴  $z$  不变， $x'$ 、 $y'$  旋转了  $45^\circ$ ，感应主轴折射率分别为：

$$\begin{aligned} n_x' &= \left( \frac{1}{n_o^2} - r_{22} E_x \right)^{-1/2} \approx n_o \left( 1 + \frac{1}{2} n_o^2 r_{22} E_x \right) \\ n_y' &= \left( \frac{1}{n_o^2} + r_{22} E_x \right)^{-1/2} \approx n_o \left( 1 - \frac{1}{2} n_o^2 r_{22} E_x \right) \\ n_z &= n_e \end{aligned} \quad (4)$$

这表明在  $x'$  方向的感应主轴折射率  $n_{x'}$  比原来的主折射率  $n_o$  增大了，而  $y'$  方向的感应主轴折射率  $n_{y'}$  比原来的主折射率  $n_o$  减小了，其差值比

$$\Delta n = n_x' - n_y' = n_o^3 r_{22} E_x$$

若设  $z$  轴方向射到晶体上的光是  $x$ (或  $y$ )轴方向振动的线偏振光，在未加电压时，晶体对各个方向振动沿  $z$  轴传输的光的折射率都相同（为  $n_o$ ），因而光通过晶体后不改变偏振态，但在  $x$  轴方向加电压后，由于折射率椭球变了形，感应主轴方向  $x'$  和  $y'$  方向转了  $45^\circ$ ，且感应主折射率变为  $n_{x'}$  和  $n_{y'}$ ，是两个不相等的数，所以  $x$  方向（或  $y$  方向）振动的光进入晶体就要分解为  $x'$  和  $y'$  方向振动的二个偏振分量，射出晶体时两者就有位相差。

当  $x'$  和  $y'$  方向上两个振动分量经过长为  $L$  的晶体而出射，这时两个分量间存在的位相差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \cdot \Delta n = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{22} \cdot \frac{L}{d} V \quad (5)$$

式中  $d$  为  $x$ （加电场）方向上的晶体厚度， $V$  为所加的电压。两个偏振分量的位相差  $\delta$  是由晶体的电光效应引起的，故称为晶体的电光延迟。在晶体尺寸一定情况下，它与所加电压成线性关系。

如设入射到加压晶体上的线偏振光的强度为  $I_0$ ，则从检偏器出来的光强可表示为

$$I = I_0 \sin^2 \delta / 2 \quad (7)$$

对于  $x$  方向加场  $z$  向通过的  $\text{LiNbO}_3$  晶体， $\delta$  由(5)式确定，可改写为

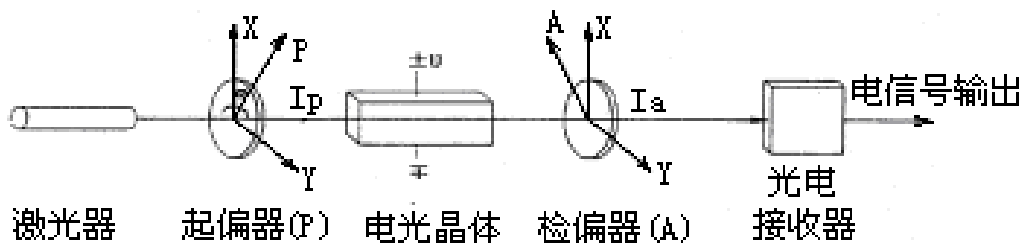
$$\delta = \pi V / V_\pi \quad (8)$$

所以

$$\frac{I}{I_0} = \sin^2 \left( \frac{\pi V}{2V_\pi} \right) \quad (9)$$

可见，从检偏器出来的光强随所加电压而变，这就实现了电光强度调制的目的。因此，一个电光晶体配以起偏器和检偏器，就能组成一个简单的电光强度调制，如图所示。

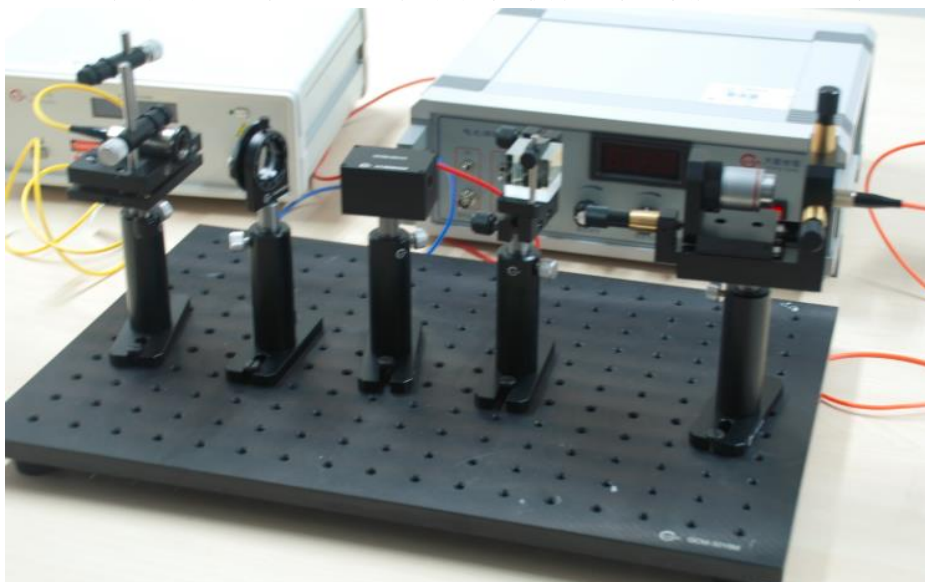




光纤电压传感器利用光纤的传输功能，结合电光效应，研究接收器的光强随电光晶体两端的电压变化。

#### 四、实验内容

1、按照下图安装实验光路，自左向右为光纤激光准直镜（波长 650nm，功率 2mW）、偏振片、电光晶体、偏振分光棱镜、光纤耦合器、功率计。



2、首先调整光纤准直镜使出射激光光斑沿中心传播。

3、安装电光晶体，调整晶体位置，使出射激光能完全通过电光晶体。

4、按照光路分别安装偏振片和分光棱镜，只需调整器件高低使激光从器件中心通过即可。

5、调整偏振片的偏振方向使透过偏振分光棱镜的激光强度最大（透过偏振分光棱镜的光为水平偏振光，偏振分光棱镜反射光为垂直偏振光）。在偏振分光棱镜后安装光纤耦合器，调整耦合镜的位置与光纤端口位置使更多激光耦合到光纤中，最终在功率计上会显示耦合光最大值。

6、打开光纤电压传感器电源（电光电源）开关，逐渐旋转电压调节旋钮，同时观察功率计示数变化，可以每隔 50V 记录一个功率计示数，完成下表，绘制变化曲线。（注：由于电光电源前面板功能旋钮较多，使用时我们只需调整高压调节旋钮即可，其他功能旋钮将在电光调制实验使用，此实验不建议调节）

电压(V)	0	50				1000
透射光功率 (uW)	0					

7、将功率计探头移到偏振分光棱镜的反射光路，调整电压旋钮，记录功率随电压的变化数据，完成下表，绘制变化曲线，分析变化曲线与透射曲线异同。

电压(V)	0	50				1000
反射光功率 (uW)	0					



## 实验七 光纤电流传感实验

### 一、引言

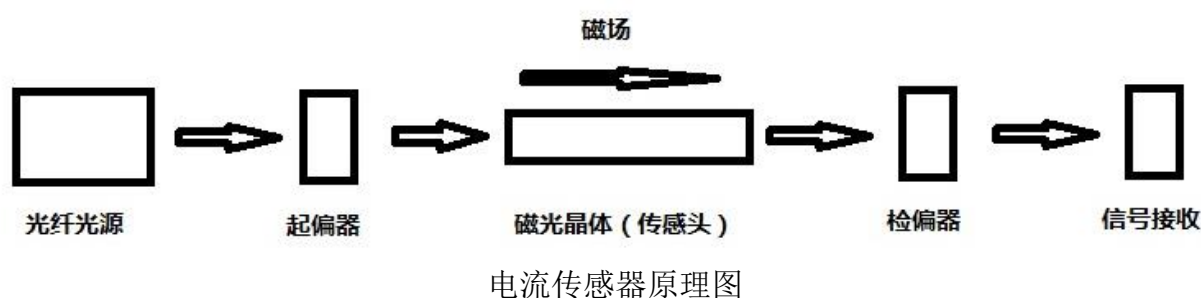
传统的电磁式互感器因为其固有的一些缺点，如带宽窄、易燃易爆、次级开路高压等，都制约了电力工业的发展，开发出新型的光电式电流互感器已经成为国内外电力工业的研究热点。随着光电子学的发展和成熟，国内外很多大学和科研机构开始投入精力研究光电式电流互感器，发展到现在，已经取得了很大进步。

### 二、实验目的

- 1、了解光纤电流传感的基本原理
- 2、掌握光纤电流传感的测试方法，记录并分析相关数据

### 三、基本原理

光纤电压传感是根据法拉第磁光效应，在被测电流产生的磁场作用下，晶体光学介质中沿磁场方向传播的线偏振光的偏振方向将发生变化，偏振角的变化，从而引起在光纤中光功率的变化，这是光学电流传感器的理论基础。



当一束线偏振光通过放置在磁场中的法拉第磁光材料后，若磁场方向与光的传播方向平行，则出射线偏振光的偏振平面将产生旋转，即电流信号产生的磁场信号对偏振光波的偏振面进行调制，此时

$$\theta = VHL$$

式中， $\theta$  为偏振面的偏转角； $L$  为光通过介质的路径长度； $H$  为磁场强度； $V$  为磁光材料的特性常数—费尔德(Verdet)常数，它与介质的性质、工作波长和温度有关。

光源发出的光经起偏器后变成线偏振光，线偏振光经过位于电流产生的磁场中的磁光材料后偏振方向受到磁场调制，经过检偏器后进行强度探测和信号处理。

根据马吕斯定律，若不考虑衰减，起偏器的射出光强与检偏器的射出光强之间有如下关系

$$I = I_0 \cos^2 \theta'$$

$\theta'$  是导线中无电流流过 ( $I=0$ ) 时的起偏器与检偏器的透光轴相交的角度。

由于  $\theta'$  角不能直接精确检测出，而是通过光强的变化来反映的，在根据上式

进行  $\theta' - I$  转换时，为了得到最大的转换灵敏度和最佳线性度，要考虑起偏器与检偏器的透光轴相交的角度  $\theta'$  的位置

光强对的变化率，即转换灵敏度为

$$\frac{dI}{d\theta'} = -2I_0 \sin \theta' \cos \theta' = -I_0 \sin 2\theta'$$

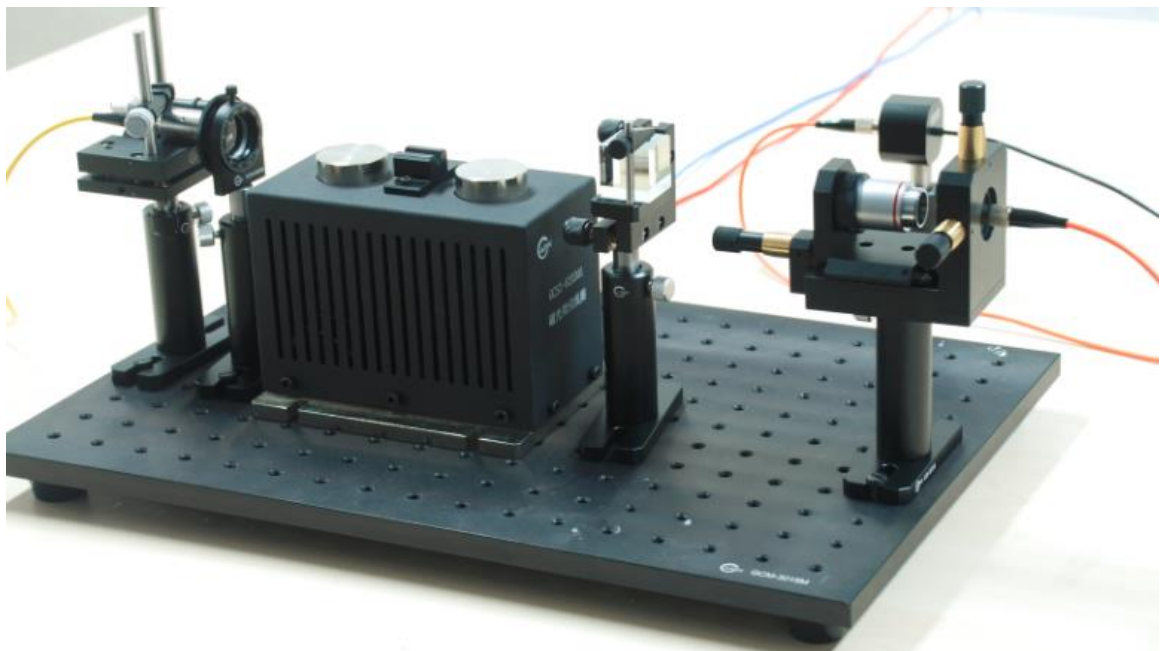
令  $dI/d\theta' = 0$ ，求得最大灵敏度位于  $\theta' = (2k+1)\pi/4$  ( $k$ 为整数) 的那些点(上图中的B点)，同时可以看出，由于在该处曲线斜率的变化率为零( $d^2I/d\theta'^2 = 0$ )，因此B点也是线性度最好的点。如果将交角  $\theta'$  固定在  $45^\circ$ ，当有电流流过产生的磁场使偏振方向偏转  $\theta$  角时

$$I = I_0 \cos^2(45^\circ + \theta) = \frac{1}{2} I_0 (1 - \sin 2\theta)$$

实验中电流传感电源箱可以给磁光线圈提供电流并显示示数，这样只需通过监视通过检偏器的出射光功率即可获取功率与电流的一一对应关系。

#### 四、实验内容

1、按照下图安装实验光路，自右向左为光纤激光准直镜（波长 650nm，功率 2mW）、偏振片、磁光晶体、偏振分光棱镜、光纤耦合器、功率计。



光纤电流传感实物图

- 2、首先调整光纤准直镜使出射激光光斑沿导轨中心传播。
- 3、安装磁光晶体，调整线圈固定孔位，使出射激光能完全通过磁光晶体。
- 4、按照光路分别安装偏振片和分光棱镜，只需调整器件高低使激光从器件中心通过即可。

5、调整偏振片的偏振方向使透过偏振分光棱镜的激光强度最小（透过偏振分光棱镜的光为水平偏振光，偏振分光棱镜反射光为垂直偏振光）。调整光纤准直镜使透过偏振片的激光最强，同时记下偏振片的消光角度，调整偏振片角度使通过偏振分光棱镜后最强，安装光纤耦合器，调整耦合镜的位置与光纤端口位置使更多激光耦合到光纤中，最终在功率计上会显示耦合光最大值。然后调整偏振片使功率计示数为 0。（即旋回消光位置）

6、打开光纤电流电源开关，逐渐旋转电流调节旋钮，同时观察功率计示数变化，可以每隔 0.05A 记录一个功率计示数，完成下表，绘制变化曲线。（注：由于电阻线圈在通电过程有一定发热量，所以在数据记录完成后马上将电流调到较低水平，如小于<0.3A）

电流(A)	0	0.05				1
透射光功率（uW）	0					