



## 实验名称: 光纤传感器

姓名: 刘子言 学号: 20002462 实验班: G13 组号: 15 教师: 倪一

### 一、实验目的

1. 了解光纤导光的原理以及光纤的结构知识;
2. 掌握单模光纤切割的基本方法及宝石刀的使用技巧;
3. 掌握光纤耦合的直接耦合和间接耦合的基本原理, 以及耦合效率的计算方法;
4. 理解光纤温度传感器的基本工作原理, 掌握温度延迟的现象及分析, 以及掌握光纤灵敏度的计算方法。

### 二、实验原理

#### 1. 光纤的基础知识

- (1) 光纤的基本结构。由内到外分为4层——纤芯、包层、涂敷层(起保护作用)、较厚的保护层;
- (2) 光纤导光的原理: 如下图所示, 纤芯的折射率 $n_1$ 比包层 $n_2$ 的折射率大, 产生全反射从而使光线在光纤中传播。在光纤端面上, 当光线入射角小于一定值 $\theta_a$ 时, 光线在纤芯和包层界面上的入射角 $\varphi$ 才会大于临界角 $\varphi_m$ , 光线才能在光纤内多次全反射而传播到另一端。入射角 $\theta_a$ 称为光纤的孔径角, 它的数值由光纤的数值孔径决定。数值孔径(NA)定义为:

$$NA = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

①  $n_0$  为入射光线所在介质的折射率; ② NA 是表示光纤集光能力的一个参量, 越大, 光纤接收的光通量越多。

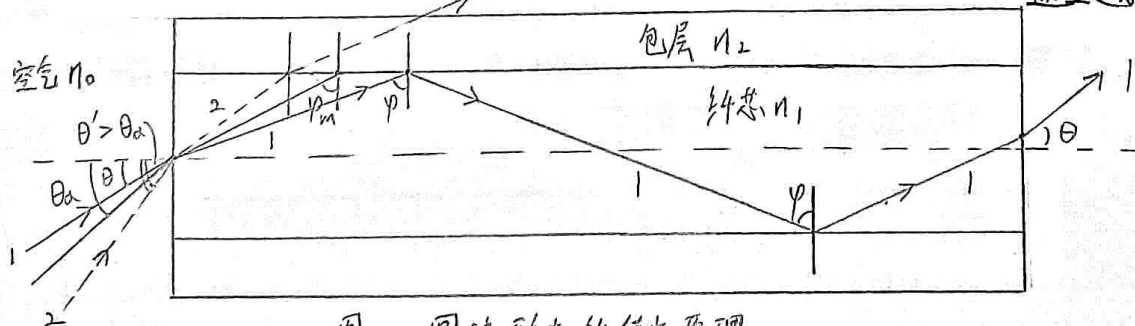


图1: 圆柱形光纤传光原理





## 2. 光纤耦合

- 1) 直接耦合: 是使光纤直接对准光源输出的光进行的"对接"耦合。
- 2) 聚光器件耦合: 是将光源发出的光通过聚光器件将其聚集焦到光纤端面上, 并调整到最佳位置(光纤输出端的输出光强最大)。
- 3) 耦合效率:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \times 100\% \quad \text{或} \quad \eta = -10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ (dB)} \quad (2)$$

光耦合效率与光纤端面质量和耦合透镜的数值孔径有关, 当光纤端面处理的质量较好, 数值孔径与耦合透镜数值孔径相匹配时, 可得到最佳耦合效率。

## 3. 光纤温度传感

- 1) 光纤干涉仪: 由两臂组成, 一个参考臂, 提供相位基准, 另一个是传感臂, 用于光相位调制, 对待测物理量的变化敏感。光线入射以后, 分别通过两臂输出的光束的光程差决定了干涉光场的明暗分布, 凡是能引起光程差变化的外界因素, 均可引起条纹移动。
- 2) 测温原理: 测量臂光纤受到温度场作用, 纤芯折射率和几何长度会有一微小变化, 使沿此臂传播的光波光程发生变化, 则两臂输出端光波相位差发生变化, 从而引起干涉场干涉条纹的移动。干涉条纹的移动数因反映出温度场温度的变化。

$$\text{温度灵敏度: } \frac{\Delta\varphi}{\Delta T \cdot L} = \frac{2\pi \Delta m}{\Delta T \cdot L} = \frac{2\pi}{L} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta T} \quad (3)$$

其中  $\Delta m$  为当温度变化  $\Delta T$  时, 干涉场中任意一点上干涉条纹的移动数因,  $L$  为所使用的光纤的长度,  $\Delta T$  内, 相位变化量  $\Delta\varphi = 2\pi m$ 。传感器原理图如下图 2:

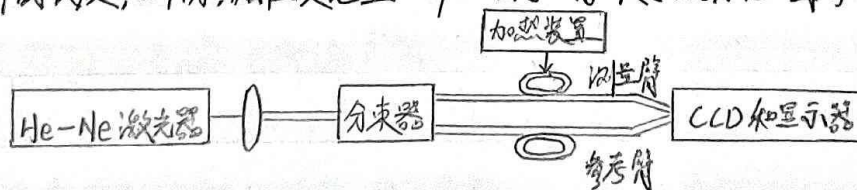


图 2: 传感器原理图





## 三、实验仪器

光纤传感实验中的实验仪器包括：激光器、电源，光纤夹具，透镜，光纤剥线钳，光纤切割锯，激光功率计，五位调整架，显微镜，光纤传感实验仪，CCD及显示器。

## 四、实验内容与主要步骤

### 1. 光纤端面制作

先用剥线钳剥去涂敷层，将剩下的包层和纤芯嵌入光纤夹具，用宝石刀切割端面，制备出完好的光纤端面。

### 2. 光纤耦合效率测量

- (1) 将切割好的端面的光纤固定在五位调整架上，并使光纤大致对准激光器；
- (2) 打开激光器，将功率计对准激光器的光出口处，测量激光器的输出功率，记录光功率计读数，调节五位调整架，使激光打在光纤端面上，将光纤的另一端（PC头）旋入功率计测量端口上；
- (3) 仔细调节五位调整架，使得激光与光纤的耦合达到最佳状态，当功率计示数最大时，记录光功率计读数。计算激光与光纤直接耦合的耦合效率；
- (4) 将透镜放入五位调整架上，仔细调节五位调整架，使得激光与光纤的耦合达到最佳状态，当功率计示数最大时，记录光功率计读数。计算激光与光纤间接耦合的耦合效率。

### 3. 光纤传感实验

- (1) 打开数显调节仪总电源，打开激光器、显示器电源；
- (2) 调节分光装置与聚光装置支架的垂直高度与水平位置，使经过分束镜分开后的光线，再经棱镜聚合照射到CCD上时，能在显示器上观察到清晰的干涉条纹；
- (3) 按下数显调节仪上的温度设定按钮，设置最高加热温度在60℃左右，弹起





温度设定按钮,此时数显调书仪上显示的是将被加热的光纤实时温度,

- (14) 打开加热开关,在显示器上选择合适的参考位置,观察条纹变化,当温度示数在31℃左右时,开始记录数据:条纹每移动3条,记录其对应温度,记录14组数据;被加热的光纤长度以仪器上显示的长度计算,计算出升温时光纤温度灵敏度;
- (15) 关闭电源,加热装置自然降温,在显示器上选择合适的参考位置,观察条纹变化,记录降温时的温度变化数据,计算降温时光纤温度灵敏度;
- (16) 实验完毕后,关闭所有电源,整理好各仪器。

## 五. 数据记录与处理

### 1. 光纤耦合效率测量

#### (1) 计算光纤的直接耦合率

功率计直接测量激光器发出的激光光强为  $P_2 = 2.024 \text{ mW}$

激光与光纤直接耦合时功率计测出的光强强度  $P_1 = 607 \text{ nW}$

由公式②计算光与光纤的直接耦合效率为:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \times 100\% = \frac{607 \times 10^{-6}}{2.024} \times 100\% \approx 0.030\%$$

#### (2) 计算光纤的间接耦合率

激光与光纤间接耦合时功率计测出的光强强度  $P'_1 = 1720 \text{ nW}$

由公式②计算光与光纤的间接耦合效率为:

$$\eta' = \frac{P'_1}{P_2} \times 100\% = \frac{1720 \times 10^{-6}}{2.024} \times 100\% \approx 0.085\%$$

### 2. 光纤温度传感实验光纤灵敏度数据处理

- 光纤被加热部分的长度  $l = 0.10 \text{ m}$
- 实验使用的激光的波长  $\lambda = 633 \text{ nm}$





## 11) 升温过程实验数据记录表格:

移动条纹数	+0	+3	+6	+9	+12	+15	+18	+21	+24	+27	+30	+33	+36	+39
温度示数/°C	30.65	32.12	33.67	35.17	36.67	38.17	39.67	41.17	42.67	44.17	45.67	47.17	48.67	50.17

## 12) 降温过程实验数据记录表格:

移动条纹数	-0	-3	-6	-9	-12	-15	-18	-21	-24	-27	-30	-33	-36	-39
温度示数/°C	49.94	48.91	47.86	46.82	45.77	44.73	43.68	42.64	41.59	40.55	39.50	38.46	37.41	36.36

## (3) 计算光纤的温度灵敏度

由 Excel 表绘制并线性拟合了升温/降温过程温度-条纹数关系图, 升温过程如图3所示, 降温过程如图4所示。

由线性拟合的直线斜率可得:

$$\text{升温 } k_1 = 1.9976 (^{\circ}\text{C}^{-1}) \quad \text{降温 } k_2 = 2.8714 (^{\circ}\text{C}^{-1})$$

由公式③  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta T} = \frac{2\pi \Delta m}{\Delta T \cdot L} = \frac{2\pi}{L} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta T}$  可得: (以下将灵敏度记为  $S_{up}$ 、 $S_{down}$ )

$$\text{升温时: } k_1 = \frac{L}{2\pi} \cdot S_{up}$$

$$\therefore S_{up} = \frac{2\pi}{L} \cdot k_1 = \frac{2\pi}{0.10} \times 1.9976 = 125.51 \text{ rad/(cm} \cdot ^{\circ}\text{C)}$$

$$\text{降温时: } k_2 = \frac{L}{2\pi} \cdot S_{down}$$

$$\therefore S_{down} = \frac{2\pi}{L} \cdot k_2 = \frac{2\pi}{0.10} \times 2.8714 = 180.39 \text{ rad/(cm} \cdot ^{\circ}\text{C)}$$

## 六、实验结果与讨论

1. 通过本实验, 基本了解了光纤导光、耦合、温度传感的基本原理, 掌握了光纤剥层切割、耦合效率计算、光纤温度传感器的使用方法、灵敏度的计算等方法。
2. 由于光耦合效率与光纤端面质量和耦合透镜的数值孔径有关, 由计算结果也可见: 光纤的间接耦合效率比直接耦合效率要高, 说明数值孔径与耦合透镜数值孔径相匹配时, 可得到较高的耦合效率。





- 3、在光纤温度传感实验中,由绘图法可以较为精确地找出灵敏度,观察比较最终结果,可以发现降温时光纤的灵敏度大于升温时光纤的灵敏度。(温度灵敏度)
- 4、实验过程中需要认真仔细,尤其是在数条纹数记录对应温度时,可以将升温速度适当调低一点,仔细计数、记录。同时可以以显示器中心点作为参考点来观察。

## 七、分析讨论题

1、能否不用分束器做该实验?是否有替代方案是什么?

答:可以不用分束器,只需用2个相同的相干波波源分别照射光纤即可,这样也可以形成光的干涉,也能够通过改变温度观察条纹移动。

2、温度改变 $1^{\circ}\text{C}$ 时,条纹的移动量与哪些因素有关?

答:①与光纤被置于温度场的长度 $L$ 有关;②与光纤的温度灵敏度有关。

3、实验中不用CCD是否也有办法看到干涉条纹?替代方案是什么?

答:可以不用CCD,可以利用透镜将干涉条纹成像在光电探测器上,再进行观察干涉条纹,以及温度的记录。

4、标定干涉仪光纤温度灵敏度的误差主要来源是什么?

答:①由于温度示数处于不断变化的状态,每移动3个条纹,人眼记录的温度值可能存在一定的误差;②计数条纹时(每次数3个)可能会存在误差,但此误差可以通过细心、仔细操作来避免;③环境因素(虚拟实验环境可能影响较小)。

5、在测温光纤传感器的测温臂感温段光纤上粘上一金属片,其温度灵敏度会如何变化?

答:粘上金属片,会影响传感器的响应速度,但不会影响其灵敏度。因为光纤温度传感器直接反映的是自身温度,测温过程中,传感器被加热或冷却到与被测温度一致时,便反映了被测温度,这便是温度传感器的延迟性;而粘金属片,影响的是传感器自身温度到达被测温度一致的时间,不会影响其本身的灵敏度。

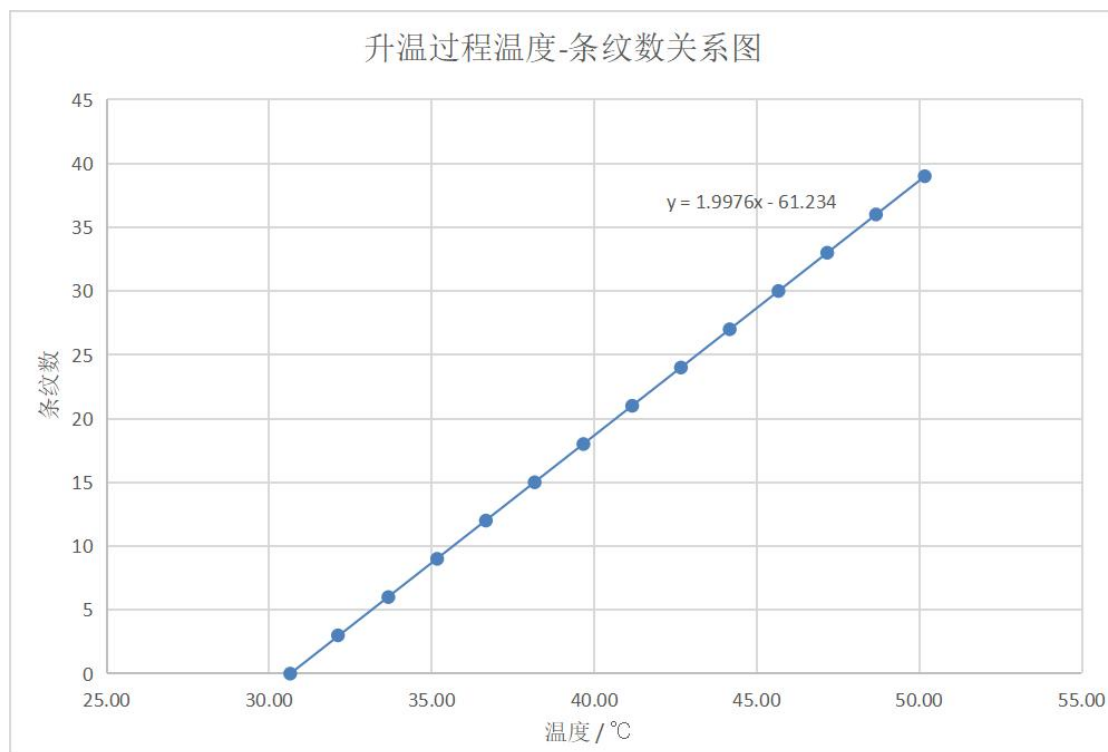


图 3 升温过程温度-条纹数关系图

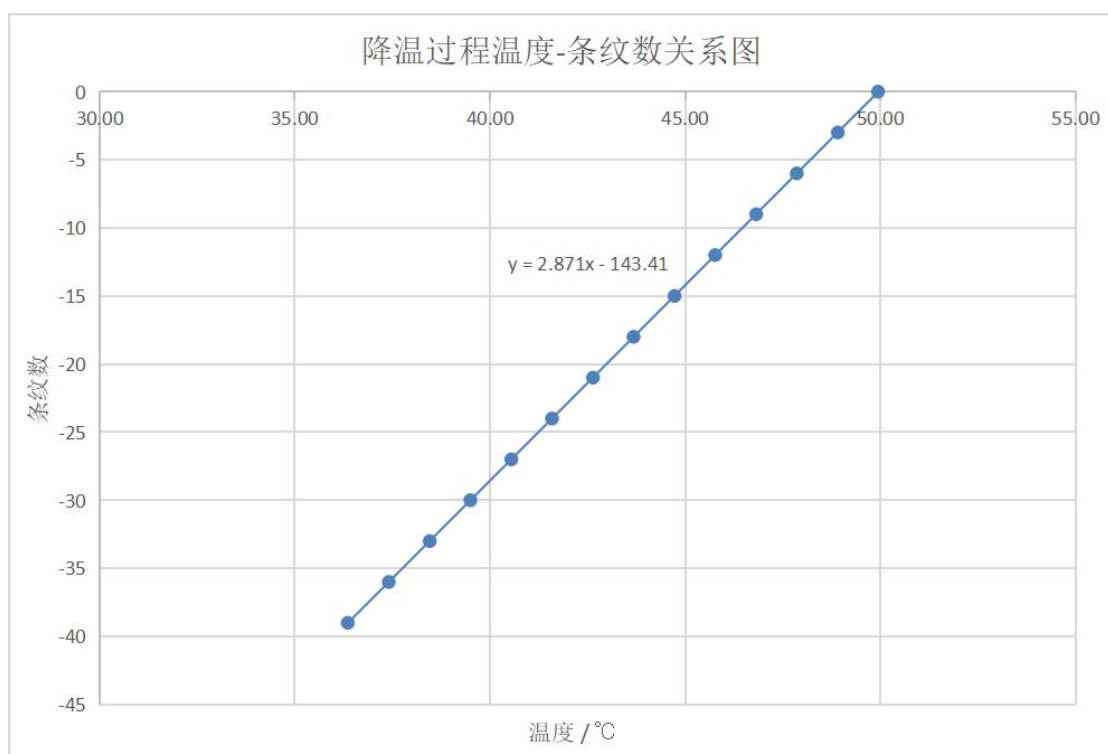


图 4 降温过程温度-条纹数关系图