

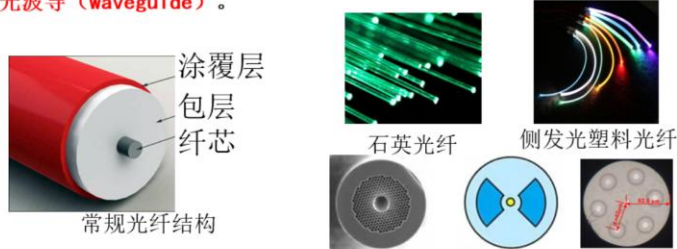
## 第一章 光纤传感技术基础

- ❖ 1.1 光纤传感技术历史与现状
- ❖ 1.2 光纤结构、分类及主要特性
- ❖ 1.3 光纤的传光原理
- ❖ 1.4 光纤制备
- ❖ 1.5 光纤的主要特性

## 第二章 光纤传感系统

- ❖ 2.1 光纤传感器的基本组成
- ❖ 2.2 光源、光探测器
- ❖ 2.3 光纤无源器件
- ❖ 2.4 光纤耦合技术
- ❖ 2.5 光纤传感器的分类

概念：光纤是用光透射率高的介质（如石英、玻璃、塑料等）构成的一维光波导（waveguide）。

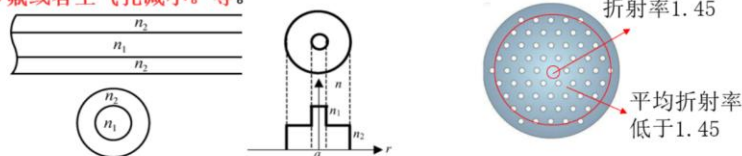


❖ 多层介质结构：

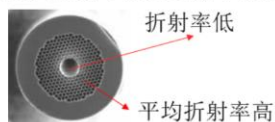
光子晶体光纤 保偏光纤 多芯光纤

- 1、纤芯：石英玻璃，直径 $5-75\mu\text{m}$ ，材料以二氧化硅为主，掺杂微量元素。
- 2、包层：直径 $100-200\mu\text{m}$ ，折射率略低于纤芯。
- 3、涂敷层：硅酮或丙烯酸酯，隔离杂光，保护。
- 4、尼龙或其他有机材料，提高机械强度，保护光纤。

导光原理1: **全反射原理**, 纤芯的折射率比外侧包层的折射率大时, 光就被“束缚”在光纤里面传播。实现方法一般是材料掺杂锗、硼、磷升高, 参氟或者空气孔减小。等。



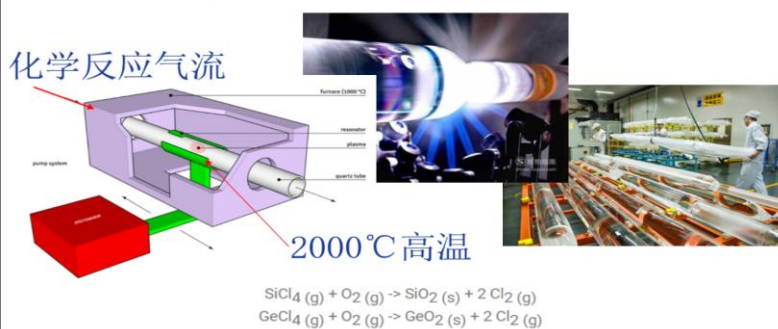
\*导光原理2: **光子带隙原理**, 光子带隙型光子晶体光纤要求包层空气孔结构具有严格的周期性。纤芯的引入使其周期性结构遭到破坏时, 就形成了具有一定频宽的缺陷态或局域态, 而只有特定频率的光波可以在这个缺陷区域中传播, 其他频率的光波则不能传播, 即光子带隙效应。



## 1.2 光纤结构与制造

光纤制造方法: 一般采用两步法制造光纤。第一步制造光纤预制棒, 第二步拉制光纤

**第一步: 物理化学气相沉积法制造光纤预制棒**



## 1.2 光纤结构与制造

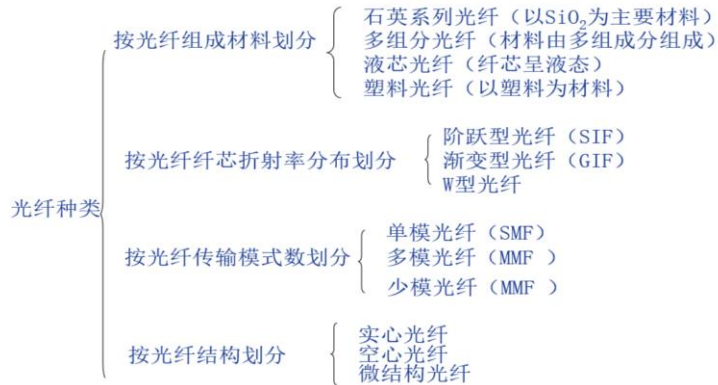
光纤制造方法: 一般采用两步法制造光纤。第一步制造光纤预制棒, 第二步拉制光纤

**第二步: 光纤预制棒拉丝**



## 1.2 光纤结构与制造

光纤分类方法:



## 1.3 相关光学理论基础回顾

光波的物理学基础:

### 1. 粒子光学



ISSAC NEWTON



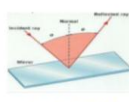
ALBERT EINSTEIN

基本理论:

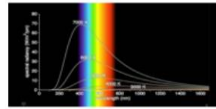
光是由一些小颗粒组成, 运动遵循牛顿定律, 如直线传播, 反射, 小孔成像、黑体辐射、光电效应等。(但是不能解释折射现象)



直线传播



光线反射



黑体辐射



光电效应

有利于我们理解光的传播、产生以及探测原理

## 1.3 相关光学理论基础回顾

光波的物理学基础:

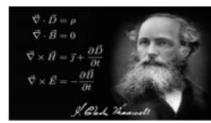
### 2. 波动光学



惠更斯



菲涅尔



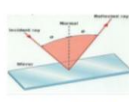
麦克斯韦

基本理论:

光的本质是波, 运动遵循波动方程, 可以解释直线传播, 反射, 折射, 色散, 偏振, 但是不能解释黑体辐射、光电效应等现象



直线传播



光线反射



光折射



光色散



光偏振

有利于我们理解光的传播、产生以及探测原理

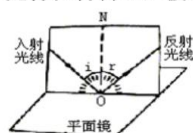
## 1.3 相关光学理论基础回顾

光波的数学描述:

### 1. 线性光学

基本理论:

- 光沿直线传播，遇到平面将会反射。反射行为就像弹性小球，入射角等于反射角。
- 光在发生黑体辐射发光时，能量是一份一份向外发出的，而不是连续的，每一份能量被称为一个光子。
- 光打在材料上，被电子吸收时，也是一份一份被吸收的。不能连续被吸



反射定律  $i=r$



## 1.3 相关光学理论基础回顾

光波的数学描述:

### 2. 波动光学

基本理论:

光的本质是波，运动遵循波动方程，可以解释直线传播，反射，折射，色散，光速、偏振，但是不能解释黑体辐射、光电效应等现象。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

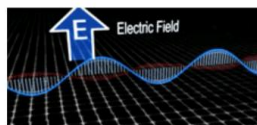
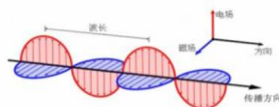
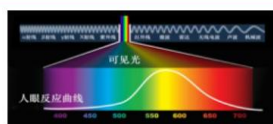
光波满足麦克斯韦方程组

平面波解

$$\mathbf{E}_x = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - kz) \hat{x}$$

$$\mathbf{E}_y = 0$$

$$\mathbf{E}_z = 0$$

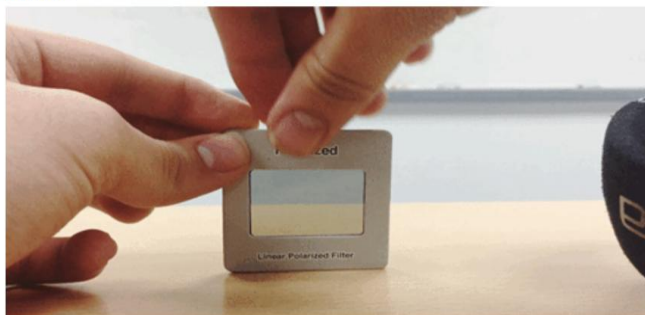
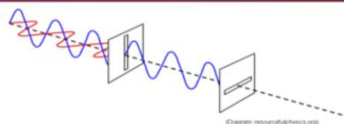


## 1.3 相关光学理论基础回顾

光波的数学描述:

### 2. 波动光学

光波的偏振





## 1.3相关光学理论基础回顾

光波的数学描述:

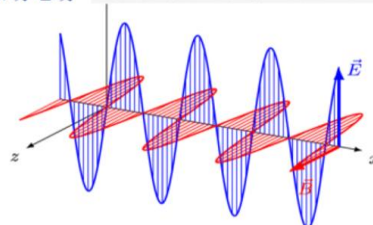
### 2. 波动光学

光波的偏振

$$E_1 = E_0 \cos(\omega_1 t - kz + \varphi_1) \quad X\text{轴振动电场}$$

$$E_2 = E_0 \cos(\omega_2 t - kz + \varphi_2) \quad Y\text{轴振动电场}$$

线偏振光  $\varphi_1 = \varphi_2$



## 1.3相关光学理论基础回顾

光波的数学描述:

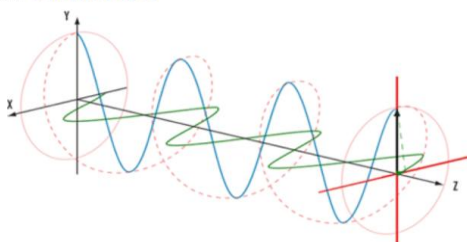
### 2. 波动光学

光波的偏振

$$E_1 = E_0 \cos(\omega_1 t - kz + \varphi_1) \quad X\text{轴振动电场}$$

$$E_2 = E_0 \cos(\omega_2 t - kz + \varphi_2) \quad Y\text{轴振动电场}$$

圆偏振光  $\varphi_1 = \varphi_2 \pm 90^\circ$



## 1.4光纤中的重要概念与现象

### 2. 光纤损耗

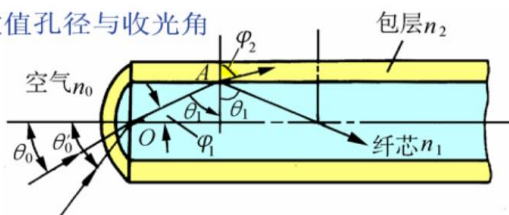
**损耗**是指光纤每单位长度上的衰减，单位为dB/km。  
光纤损耗的高低直接影响信号传输距离的远近。

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (\text{dB/km})$$

- 光纤的吸收损耗
- 光纤的散射损耗
- 光纤的结构不规则损耗
- 光纤的弯曲损耗

## 1.4 光纤中的重要概念与现象

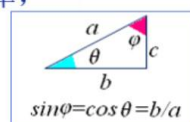
### 3. 光纤数值孔径与收光角



依据光折射和反射的斯涅尔(Snell)定律,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \varphi_2$$

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \varphi_1 = n_1 \cos \theta_1$$



当  $n_1 \sin \theta_1 = n_2$  时,  $\theta_1$  为全反射临界角。

## 1.4 光纤中的重要概念与现象

∵ 入射光在A点产生全反射的条件是:  $\theta_1 > \theta'_c$  (临界角), 即:

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

$$\sin \theta_1 > \frac{n_2}{n_1} \quad \text{或} \quad \cos \theta_1 < \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}}$$

❖ 当  $\theta_1 > \theta'_c$  时, 光线将不再折射入介质2, 而在介质1(纤芯)内产生连续向前的全反射, 直至由终端面射出。这就是光纤传光的工作基础。

同理, 光线由折射率为  $n_0$  的外界介质(空气  $n_0=1$ )射入纤芯时实现全反射的临界角(始端最大入射角)为 (3):

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \varphi_1 = n_1 \cos \theta_1 \quad \cos \theta_1 < \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}}$$

$$\sin \theta_0 = \sin \theta'_c = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA$$

式中, NA—“数值孔径”, 是衡量光纤集光性能的主要参数。

NA表示: 无论光源发射功率多大, 只有  $2\theta'_c$  张角内的光, 才能被光纤接收、传播(全反射); NA愈大, 光纤的集光能力愈强。光纤产品通常不给出折射率, 而只给出NA。石英光纤的  $NA=0.2 \sim 0.4$ 。

## NA意义讨论:

- **NA**表示光纤的集光能力，无论光源的发射功率有多大，只要在 $2\theta_0$ 张角之内的入射光才能被光纤接收、传播。若入射角超出这一范围，光线会进入包层漏光。
- 一般**NA**越大集光能力越强，光纤与光源间耦合会更容易。但**NA**越大光信号畸变越大，要选择适当。
- 产品光纤不给出折射率**N**，只给数值孔径**NA**。

## 1.4 光纤中的重要概念与现象

例： $n_1=1.48$ 、 $n_2=1.46$ 的阶跃光纤的数值孔径是多少？最大接收角是多少？

解：

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = (1.48^2 - 1.46^2)^{1/2} = 0.242$$

$$\theta_0 = \arcsin(NA) = 14^\circ$$

数值孔径还可以表示成

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = (2n_1^2)^{1/2} \times \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{(2n_1^2)^{1/2}} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

其中： $\Delta$ 为相对折射率差

## 1.5 光纤的主要特性

光纤的使用特性包括**传输特性**，**几何特性**，**机械特性**，**环境特性**等。

### 1. 传输特性：

内容主要有**衰减**，**数值孔径**，**色散**，**反向散射特性**，**群折射率**(渐变折射率光纤的等效折射率)。

### 2. 几何特性

几何特性有**纤芯直径**，**包层直径**和**涂覆层直径**，**纤芯非圆性**，**包层非圆性**和**涂敷层非圆性**，**纤芯/包层和涂敷层同心性误差**，**标准长度**。其中非圆性的计算公式为：

$$\text{非圆性}(\%) = [1 - \frac{\text{最小直径}}{\text{最大直径}}] \times 100 \quad (2.5.1)$$

纤芯/包层和涂敷层同心性误差是指纤芯与包层或包层与涂敷层的几何中心间的最大可能距离。

## ❖ 1.5 光纤的主要特性

### 3. 机械特性

机械特性对光纤的使用特别重要。光纤必须能够经受住成缆和光纤敷设过程中的压力和张力，其参数有**抗拉强度**，**静态、动态稳定疲劳**，**光纤翘曲半径**，**涂敷层剥离力**等。

抗拉强度用长为L的光纤在应力作用下断裂的概率来表示，它可由Weibull公式表述

$$F(\sigma, L) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \frac{L}{L_0}\right] \quad (2.5.2)$$

式中  $m$ 、 $\sigma_0$  和  $L_0$  是与初始惯性强度分布相关的常数。

## ❖ 1.5 光纤的主要特性

### 4. 环境特性

环境特性有**温度特性**、**水浸性能**和**湿热性能**，这部分说明因为环境条件的变化导致衰减会增加多少，比如因为石英和光纤涂敷层的热膨胀系数不同，两者的长度的变化量相差非常大，于是产生的张力会使光纤发生弯曲，增加损耗。

表2.4列出了某光纤产品的技术规范。

类别	项目	单位	技术规范
传输性能	1310nm 衰减	dB/km	≤0.36
	1550nm 衰减	dB/km	≤0.22
	衰减不连续值	dB	≤0.05
	衰减波长特性	dB/km	≤0.05
	衰减不均匀性	dB	≤0.05
	零色散波长范围	nm	1300~1324
	零色散斜率	ps/(nm <sup>2</sup> ·km)	≤0.093
	1296~1339nm 色散系数	ps/(nm·km)	≤3.5
	1271~1360nm 色散系数	ps/(nm·km)	≤5.3
	1550nm 色散系数	ps/(nm·km)	≤18
	偏振模色散(PMD)	ps/km	≤0.3
	截止波长	nm	≤1260
	宏弯损耗(1550nm, 162.5mm)	dB	37.5 半径绕 100 圈, ≤0.5

## 2.1 光纤传感器的基本组成

**光纤传感器**是利用光导纤维的传光特性，把被测量的变化转换为光特性（强度、相位、偏振态、频率、波长）变化的传感器。

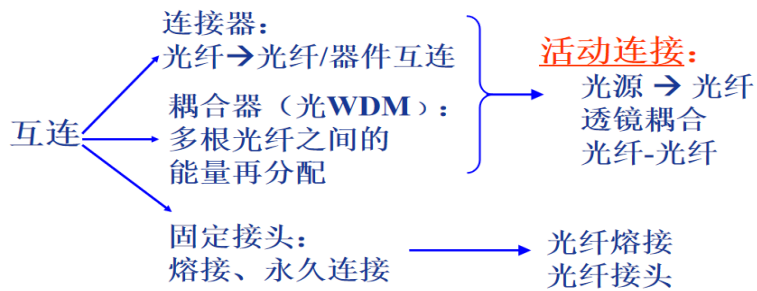
**光纤传感器的基本工作原理**将来自光源的光经过光纤送入调制器，待测参数与进入调制区的光相互作用后，导致光的光学性质（如强度、相位、偏振态、频率、波长）发生变化，成为被调制的信号光，再经过光纤送入光探测器解调，而后获得被测参数。

构成光纤传感器除**光导纤维**之外，还必须有**光源**和**光探测器**，另外还有一些**光无源器件**。



## 2.4 光纤耦合技术

### 光纤的耦合技术-光互连



## 2.5 光纤传感器的分类

### 光纤传感器分类

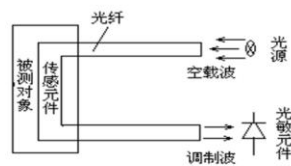
光纤传感器可分为：功能型传感器

#### 非功能传感器

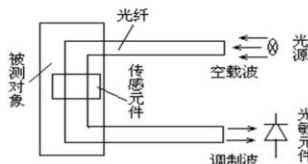


## 2.5 光纤传感器的分类

**功能型传感器**是利用光波在光纤中传播时，表征光波的特征参量（振幅、相位、偏振态、频率等），因外界因素（如温度、压力、应力、磁场、电场...等）的作用而直接或间接地发生变化，从而可将光纤用作传感元件来探测各种物理量。



**非功能传感器**是利用其他敏感元件感受被测量的变化，光纤仅作为光的传输介质，用以传输来自远处或难以接近场所的光信号，因此，也称**传光型光纤传感器**。



## 2.5 光纤传感器的分类

### ❖ 功能光纤型传感器（物性型光纤传感器）

功能型光纤传感器是利用光纤对环境变化的敏感性，即利用光纤本身的光波量的敏感特性或功能制作的传感器。

强度调制

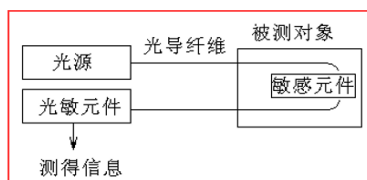
相位调制

偏振调制

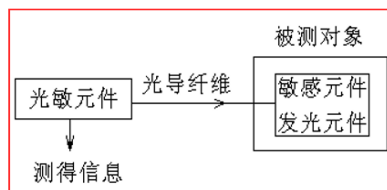
波长调制

### 非功能传感器（传光型光纤传感器）

❖ 利用其他敏感元件感受被测量的变化，光纤仅作为光的传输介质，用以传输来自远处或难以接近场所的光信号。



❖ 另一种是在光纤一端设置“敏感元件+发光元件”的组合部件，敏感元件感受被测对象的作用并将其转换为电信号后作用于发光元件，而发光元件的发光强度作为测量所得的信息。



## 光纤传感器的分类

### ► 功能型（-非功能型）

#### ► 敏感元件—光纤

#### ► 按照被调制的光波参数→

- 强度调制型
- 相位调制型
- 频率调制型
- 偏振调制型
- 波长调制型

#### ► 按照被测对象→ 70余种

### ► 核心技术—光调制技术

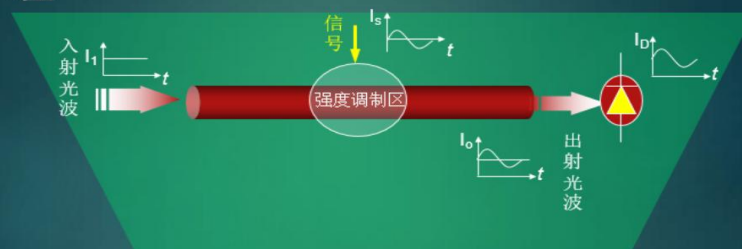


## 主要内容

- ▶ 强度调制型传感机理
- ▶ 强度调制型传感补偿技术
- ▶ 应用实例



### 3.1 强度调制型光纤传感器机理



- ▶ 特点：简单，经济，可靠
- ▶ 缺点：精度低



### 3.1 强度调制方式

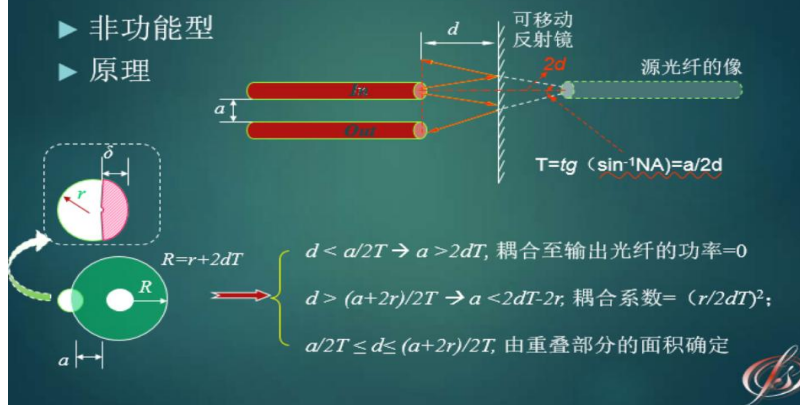
- ▶ 反射式
- ▶ 透射式
- ▶ 光模式耦合
- ▶ 折射率
- ▶ 光吸收系数



### 3.1.1 反射式

► 非功能型

► 原理



### 3.1.1 反射式 cont'd

► 重叠面积占输出光纤端面百分比:

$$\alpha = \frac{1}{\pi} \left\{ \arccos\left(1 - \frac{\delta}{r}\right) - \left(1 - \frac{\delta}{r}\right) \sin\left[\arccos\left(1 - \frac{\delta}{r}\right)\right] \right\}$$

► 接收到的入射光功率的百分比--耦合效率:

$$\frac{P_0}{P_1} = F = \alpha \left(\frac{\delta}{r}\right) \cdot \left(\frac{r}{2dT}\right)^2$$

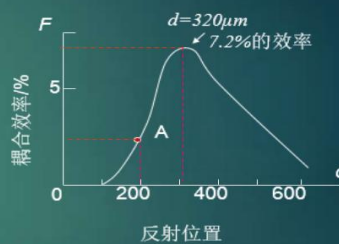
### 3.1.1 反射式 cont'd

► 设计实例: (pp.52)

► 已知: 阶跃光纤F-d曲线,  
2r=200μm, NA=0.5,  
间距 a=100 μm

► 则, F随d变化速率  
≈0.005%/ μm

► 问: 系统分辨率10⁻⁷→? (位移)





### 3.1.1 反射式 *cont'd*

- ▶ 反射式传感头的其它类型



传光束型



双光纤型

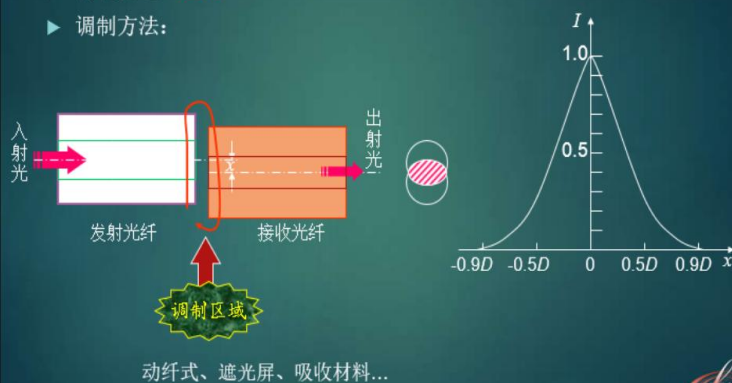


单光纤型



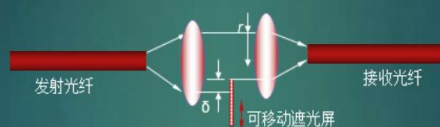
### 3.1.2 透射式

- ▶ 调制原理：遮光
- ▶ 调制方法：

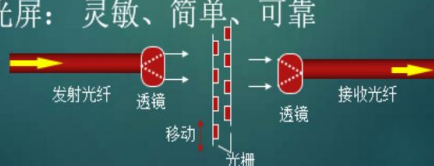


### 3.1.2 透射式 *cont'd*

- ▶ 光纤→光纤直接耦合：灵敏度低、动态范围小
- ▶ 光纤→光纤透镜耦合： $F$ 与反射式计算相同

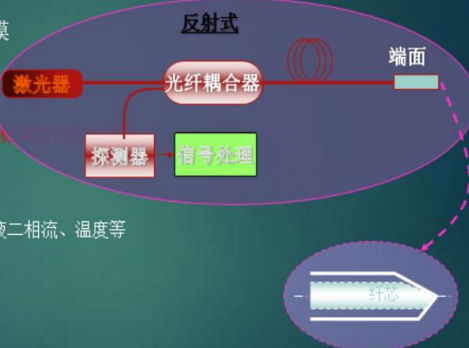


- ▶ 光栅遮光屏：灵敏、简单、可靠



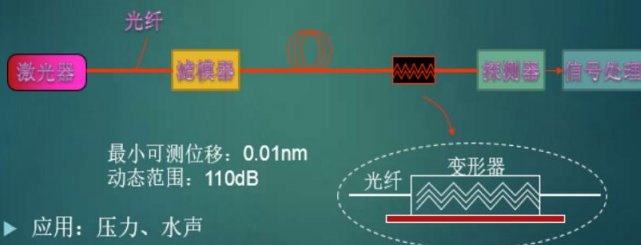
### 3.1.3 光模式-受抑全内反射传感器

- ▶ 传感头-多模光纤
- ▶ 机理- 芯模→包层模
- ▶ 类型:
  - ▶ 透射式- 振动、位移
    - ▶ 缺点: 需要精密调整装置
  - ▶ 反射式
    - ▶ 无需精密调整装置
    - ▶ 应用: 浓度、气/液二相流、温度等



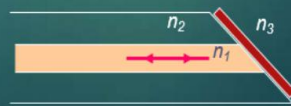
### 3.1.3 光模式-微弯传感器

- ▶ 传感头: 多模光纤
- ▶ 机理: 芯模→包层模



### 3.1.4 折射率

- ▶ 光纤折射率变化型
  - ▶ 纤芯与包层折射率温度系数不同→测温
  - ▶ 主要应用：温度报警
- ▶ 倏逝波耦合型
  - ▶ 边抛热敏光纤
  - ▶ MPD
- ▶ 反射系数型—受抑全内反射型



### 3.1.5 光吸收系数-辐射传感器

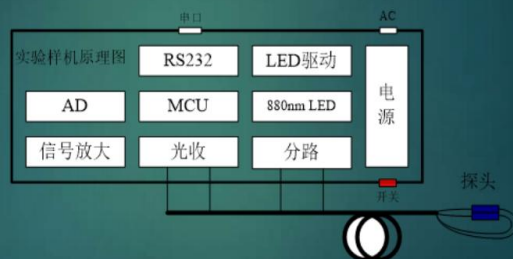
- ▶ 光纤吸收特性
  - ▶ 辐射→吸收损耗增加，输出功率下降
  - ▶ 敏感源：x射线、 $\gamma$ 射线、中子射线



- ▶ 特点：灵敏度高、线性范围大、有‘记忆’性 (pp.58 图 2-14)

### 3.1.5 光吸收系数 cont'd

- ▶ 半导体材料的吸收特性

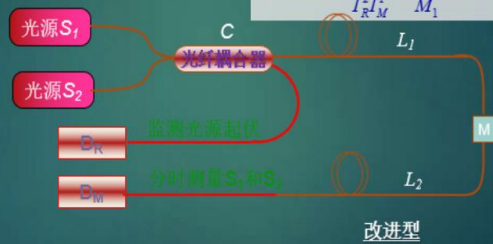


### 3.2.2\* 强度调制型的补偿技术

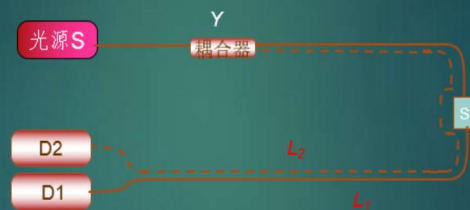
#### ► 双波长补偿法

--采用两个不同波长的光源:

$$\begin{aligned} I_R^1 &= D_R C_1 S_1, & I_M^1 &= D_M L_2 M_1 L_1 C_1 S_1 \\ I_R^2 &= D_R C_2 S_2, & I_M^2 &= D_M L_2 M_2 L_1 C_2 S_2 \\ R &= \frac{I_R^1 I_M^2}{I_R^2 I_M^1} = \frac{M_2}{M_1} \end{aligned}$$



### 3.2.3\* 旁路光监测法

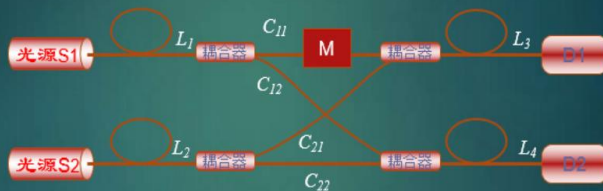


$$\begin{aligned} I_M &= SYL_1 MD_1, & I_R &= SYL_2 D_2 \\ R &= \frac{I_M}{I_R} = \frac{L_1 MD_1}{L_2 D_2} \end{aligned}$$



### 3.2.4\* 光桥平衡补偿法

#### 1. 透射式光桥平衡补偿法



► 计算:

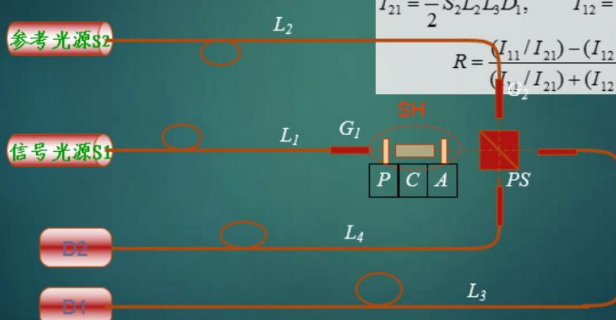
$$\Rightarrow R = \frac{I_{11}I_{22}}{I_{12}I_{21}} = \frac{C_{11}C_{22}}{C_{12}C_{21}} \cdot M$$

$$\begin{aligned} I_{11} &= S_1 L_1 C_{11} M L_3 D_1, & I_{12} &= S_1 L_1 C_{12} L_4 D_2 \\ I_{21} &= S_2 L_2 C_{21} L_3 D_1, & I_{22} &= S_2 L_2 C_{22} L_4 D_2 \end{aligned}$$



### 3.2.4\* 光桥平衡补偿法

#### ► 透射式改进型

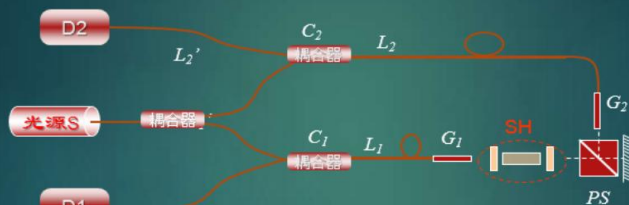


$$\begin{aligned} M_1 &= \cos^2(\delta/2), & M_2 &= \sin^2(\delta/2) \\ I_{11} &= \frac{1}{2} S_1 L_1 M_1 L_3 D_1, & I_{12} &= \frac{1}{2} S_1 L_1 M_2 L_4 D_2 \\ I_{21} &= \frac{1}{2} S_2 L_2 L_3 D_1, & I_{22} &= \frac{1}{2} S_2 L_2 L_4 D_2 \\ R &= \frac{(I_{11}/I_{21}) - (I_{12}/I_{22})}{(I_{11}/I_{21}) + (I_{12}/I_{22})} = M_1 - M_2 \end{aligned}$$



### 3.2.4\* 光桥平衡补偿法

#### ► 反射式光桥补偿法



$$\begin{aligned} M_1 &= \cos^2(\delta/2), & M_2 &= \sin^2(\delta/2) \\ I_{11} &= L_1 C_{1y} L_1^2 K^2 C_{1y} M_1 D_1, & I_{12} &= L_1 C_{1y} L_1 K L_2 C_{2y} M_2 D_2 \\ I_{21} &= L_2 C_{2y} L_2 K L_1 C_{1y} M_2 D_1, & I_{22} &= L_2 C_{2y} L_2^2 C_{2y} M_1 D_2 \\ R &= \frac{I_{11}I_{22}}{I_{21}I_{12}} = \frac{M_1^2}{M_2^2} \end{aligned}$$



### 3.2.5\* 神经网络补偿法

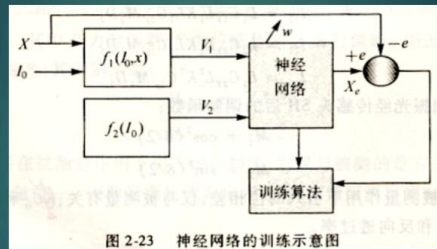


图 2-23 神经网络的训练示意图

### 3.3.1 应用例1：微弯传感器 ——压力/水声传感器

#### ► 全内反射式压力传感器

##### ► 结构

##### ► 膜片中心挠度：

$$W = \frac{3(1-\mu^2)a^4 P}{16Et^3}$$

##### ► 膜片的最低固有频率：

$$f_0 = \frac{2.56t}{\pi a^2} \sqrt{\frac{gd}{3P(1-\mu^2)}}$$

##### ► 非线性—膜片厚度

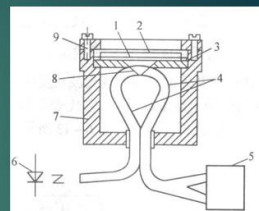


图 6-14 全内反射破坏式光纤压力传感器

1—膜片；2—光吸收层；3—垫圈；4—光导纤维；5—桥式光接收线路；6—发光二极管；7—壳体；8—透镜；9—上盖

### 3.3.1 压力/水声传感器

#### ► 微弯水声传感器

##### ► 采用长光纤

##### ► 灵敏度：

► -215dB~1V/μPa

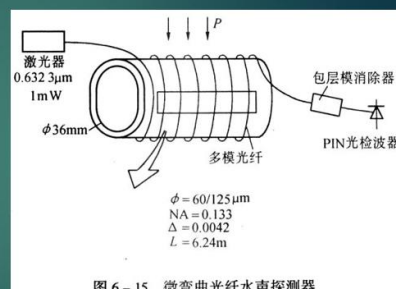


图 6-15 微弯光纤水声探测器

### 3.3.2、表面粗糙度传感器

- ▶ 光纤对传光方法
  - ▶ 限制：能量、效率、分辨率
  - ▶ 改进→光纤束

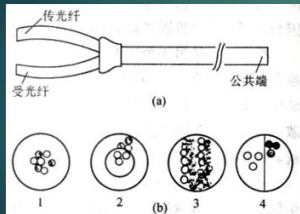


图 6-22 Y型表面粗糙度传感器  
(a) Y型光纤传感器结构；(b) 光纤分布形式  
1—随机型；2—同心圆型；3—排列型；4—对数型

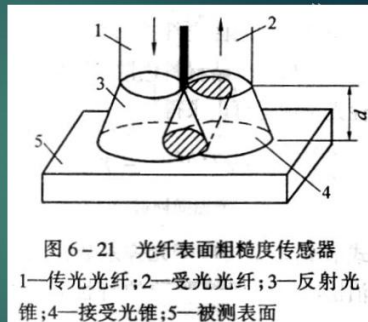


图 6-21 光纤表面粗糙度传感器  
1—传光光纤；2—受光光纤；3—反射光锥；4—接受光锥；5—被测表面

### 3.3.2 表面粗糙度传感器

cont'd

- ▶ Y型表面粗糙度传感器
  - ▶ 输出与测试距离 $d$ 关系
  - ▶ 输出、 $d$ 与粗糙度 $R_a$ 的关系
  - ▶ 输出与粗糙度 $R_a$ 的关系

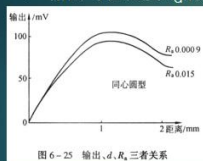


图 6-25 输出、 $d$ 、 $R_a$  三者关系

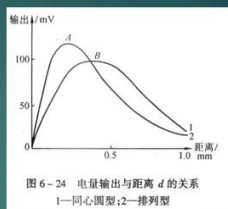


图 6-24 电量输出与距离  $d$  的关系  
1—同心圆型；2—排列型

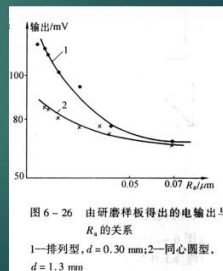


图 6-26 由研磨样板得出的电量输出与  $R_a$  的关系  
1—排列型， $d = 0.30 \text{ mm}$ ；2—同心圆型， $d = 1.3 \text{ mm}$

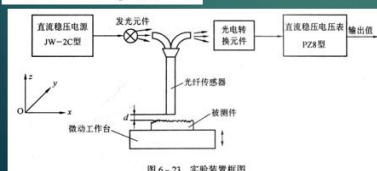


图 6-23 实验装置框图

### 3.3.2 表面粗糙度传感器

cont'd

- ▶ 内孔表面粗糙度的测量
  - ▶ 90° 探头的缺点：
    - ▶ 1)、非通用和规范的方法一定标条件→适用范围窄
    - ▶ 2)、测量灵敏度低
  - ▶ 改进—双探头法
    - ▶ 输出—无量纲  $V_0/V_{35}$
    - ▶ 不受光源功率波动和表面反射率变化限制

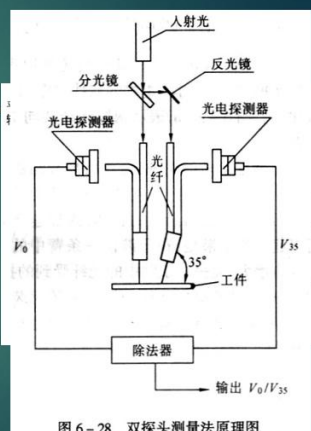


图 6-28 双探头测量法原理图



# 相位调制型 光纤传感器

Fiber Optic Sensors

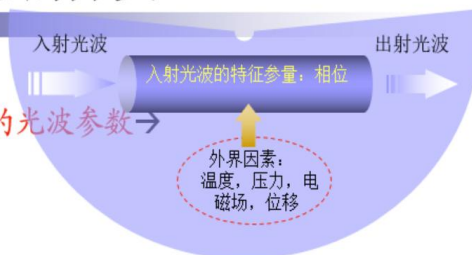
## 光纤传感器的分类

### ■ 功能型

□ 按照被调制的光波参数→

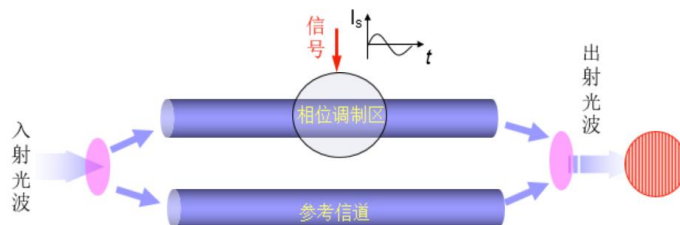
- 强度调制型
- 相位调制型
- 频率调制型
- 波长调制型
- 偏振调制型

### ■ 核心技术—光调制技术



相位调制型

## 特点



### ■ 特点:

- 干涉测量→灵敏度高
- 直接测量物理量: 应力 (压力  $10^{-7}Pa$ )、应变 ( $10^{-7}$ )、温度 ( $10^{-8}^{\circ}C$ )、电磁场
- 多参量同时测量、灵活
- 需要特殊光纤—单模、保偏、增敏、去敏



相位调制型





## \*干涉效果的定量表征一条纹的清晰度

### o 清晰度

- o 条纹的反衬度K（对比度）来定量表征清晰度

$$K = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m}$$

- o K=1: 清晰度最大 - 完全相干
- o K=0: 清晰度最低 - 非相干
- o  $0 < K < 1$ : 部分相干

- o 三个因素: 光源大小、非单色性; 两相干光波的振幅比

$$K = \frac{2(A_1/A_2)}{1 + (A_1/A_2)^2}$$

- o 当  $A_1 = A_2$  时,  $K=1$ ; 而  $A_1$  与  $A_2$  相差越多, K值越小



## \*相干条件（产生干涉的条件）

- ❖ 原子前后发出的两列光波相互独立 → 没有固定的位相关系
- ❖ 两个发光原子同时发出的波列形成的干涉图样只能在极短的时间内存在
- ❖ 接收器只能记录到强度的平均值



## 相干条件

### ❖ 干涉的三个必要条件

- ❖ 两叠加光波的位相差固定不变
- ❖ 振动方向相同
- ❖ 频率相同
- ❖ 定义: 相干光波、相干光源

### ❖ 补充条件

- ❖ 利用原子发出的同一波列
- ❖ 光程差要小于波列长度



# 光纤中的相位调制

- 应力/应变调制
- 温度调制
- 可以转化的调制

## 1 相位调制机理

- 应力应变效应

## 1 相位调制机理

表 6.1 外界压力对相移变化的影响

	横向受压 $P$	纵向受压 $P$	均匀受压 $P$
应力 $\sigma$	$\begin{bmatrix} -P \\ -P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -P \\ -P \\ -P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
应变 $\epsilon$	$\begin{bmatrix} -P(1-\mu)/E \\ -P(1-\mu)/E \\ 2\mu P/E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \mu P/E \\ \mu P/E \\ -P/E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -P(1-2\mu)/E \\ -P(1-2\mu)/E \\ -P(1-2\mu)/E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
$\frac{\Delta\varphi}{PL}$	$\frac{2k_0 n \mu}{E} + \frac{k_0 n^3}{2E}$ $\times [(1-\mu)P_{11} + (1-3\mu)P_{12}]$	$\frac{-k_0 n}{E} + \frac{k_0 n^3}{2E}$ $\times [-\mu P_{11} + (1-\mu)P_{12}]$	$\frac{-k_0 n(1-2\mu)}{E} + \frac{k_0 n^3}{2E}$ $\times (1-2\mu)(P_{11} + P_{12})$
*	$0.70 + 0.51 = 1.21$	$-2.07 + 0.45 = 1.62$	$-1.37 + 0.96 = -0.41$

第一项为  $\Delta L/L$  的值,第二项为  $\Delta n$  的值。计算时各单位取值为:  $\lambda = 0.6328 \times 10^{-6} \text{m}$ , 对于石英有:  $n = 1.456$ ,  $P_{11} = 0.121$ ,  $P_{12} = 0.270$ ,  $E = 7.10^{10} \text{Pa}$ ,  $\mu = 0.1$ 。



## 1 相位调制机理 *cont'd*

相位调制

- 温度应变效应 - 类似于应力应变效应

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta T} = k_0 \left[ L \left( \frac{dn}{dT} + n \frac{dL}{dT} \right) \right]$$

- 仅考虑径向折射率变化时:

$$\frac{\Delta\phi}{\phi\Delta T} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{\Delta T} \left\{ \varepsilon_z - \frac{n^2}{2} [(P_{11} - P_{12})\varepsilon_r + P_{11}\varepsilon_z] \right\}$$

- 对于四层光纤, 考虑边界条件:

$$\frac{\Delta\phi}{\phi\Delta T} = 0.71 \times 10^{-5} / ^\circ C, \quad \frac{\Delta\phi}{L\Delta T} = 103 \text{ rad} / (^\circ C \cdot m)$$



## 1 相位调制机理 *cont'd*

相位调制

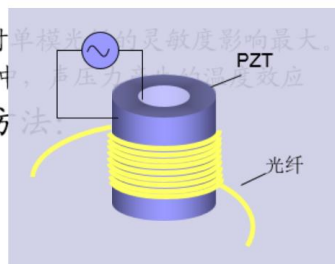
- 多层结构的考虑:

- 纤芯、包层、衬底、一次涂敷、二次涂敷...

- 结论:

- 二次涂敷对单模光纤的灵敏度影响最大。
- MZ干涉仪中, 声压力引起的应变效应

- 实现应变的方法:



## 2 光纤干涉仪的类型

相位调制

- Mach-Zehnder干涉仪和Michelson干涉仪
- Fabry-Perot干涉仪
- Sagnac干涉仪 (环形腔)
- 相位压缩原理与微分干涉仪
- 白光干涉



## 干涉测量原理

相位调制

- 双光束干涉:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\Delta\phi)$$

- 多光束干涉

$$I = \frac{I_0}{\left(1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)\right)}$$

R: 反射率;  $\phi$ : 相邻光束的相位差

- 结论

$$\text{discriminability(sensitivity)} \propto R$$



## \* 相位信号解调技术

相位调制

- 干涉仪的信号解调
- 光纤锁相环方案
- PGC (phase generator carrier)方案



## 干涉仪的解调方案

相位调制

- 主动零差法
  - 被动零差法
  - 普通外差法
  - 合成外差法
  - 伪外差法
- 零差法
- 外差法





# 光纤光栅

## 波长调制型光纤传感器

Fiber Optic Sensors

### 波长调制机理

- ◆ 引起波长变化 - 光谱特性随外界物理量而变化
  - 荧光、磷光、黑体辐射等 - 大多数为**非**功能型
  - 光纤光栅 - 功能型
- ◆ 光纤光栅 ~ 反射镜
- ◆ 应用领域 - 通信、传感、信息处理
  - 光通信器件
    - ◆ 半导体激光器、光纤激光器
    - ◆ 光纤放大器、滤波器
    - ◆ 波分复用/解复用器
    - ◆ 色散补偿
  - 传感
  - 光学信息补偿 - 光学Fourier变换、相位阵列天线



### 传感应用

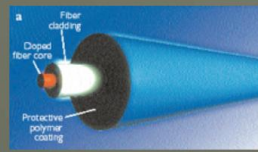
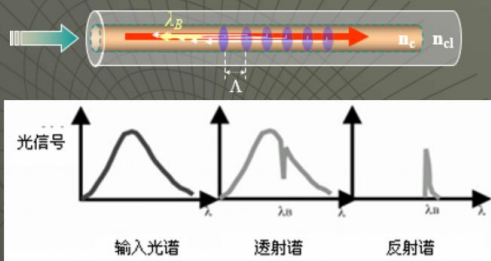
- ◆ 光纤光栅传感器
  - 优点:
    - ◆ 抗干扰能力强, 稳定、可靠
    - ◆ 传感头结构简单、体积小
    - ◆ 测量重复性好
    - ◆ 可实现绝对测量
    - ◆ 便于规模生产、成网
  - 不足: 解调系统昂贵、动态范围受限





## 光纤光栅的主要类型

### ◆ 光纤Bragg光栅(FBG)



$$\lambda_B = 2n_{core}\Lambda_{eff}$$

## 光纤光栅的主要类型

### ◆ 长周期光栅 LPG

- 导模→包层模，损耗
- 宽带透射谱—增益平坦
- 灵敏

- ◆ 制造—振幅模板、逐点写入法

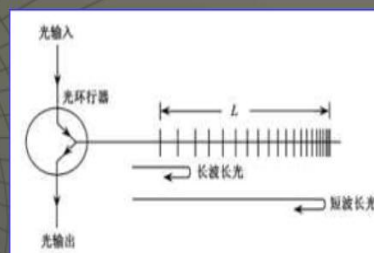
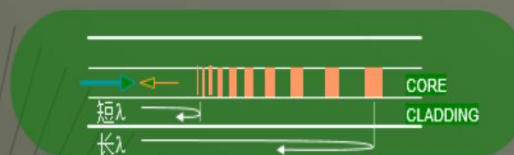


$$\lambda_L = (n_{core} - n_{cladding})\Lambda_{eff}$$

### ◆ 啁啾光栅 (chirped)

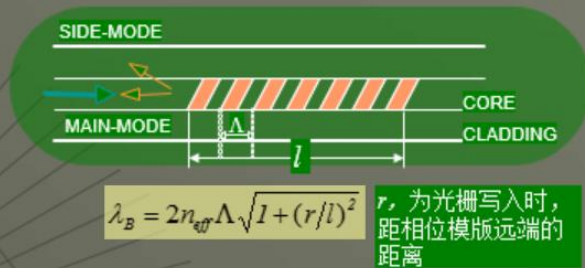
- 结构：周期沿光纤轴向变化—线性、非线性
- 宽带反射谱：可达 100nm
- 应用
  - ◆ 色散补偿
  - ◆ 宽带滤波器
  - ◆ 增益平坦

$$\lambda_B(z) = 2n_{eff}(z)\Lambda(z)$$



## ◆ 闪耀光栅

- 结构：波矢方向与光纤轴有一夹角→模式耦合：导模→包层模/异阶导模



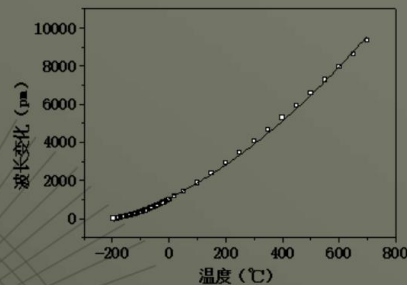
## ◆ 相位光栅

- FBG某些点处的周期性被破坏→附加相移→解复用器



## 光纤光栅温度传感原理

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta) \cdot \Delta T$$



式中， $\alpha$ 和 $\eta$ 分别是光纤的热膨胀系数和热光系数。相对于光纤的热膨胀系数，热光效应对波长改变量的贡献达到95%。中心波长为1300nm的光纤光栅，温度变化1°C将导致9.13pm的波长改变量。



## 光纤光栅应变传感原理

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \cdot \varepsilon$$

在实际应用中，光纤光栅所受的温度和应变往往同时变化

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \varepsilon + (\alpha + \eta) \Delta T$$

在应变测量光纤光栅附近放置一个自由光栅（非粘贴）用于测量温度

$$\varepsilon = \frac{1}{1 - P_e} \cdot \left[ \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - (\alpha + \eta) \Delta T \right]$$



### 光纤光栅实现多参数分布式检测的优势：

- 在单根光纤上，可实现多点分布式测量
- 光信号传感与传输，抗电磁干扰，安全性高
- 光波长信号不易受光强和环境影响，信号传输的可靠性高
- 光波长变化与被测量的对应关系唯一确定，便于信号分辨与处理
- 检测信号可实现远距离传输

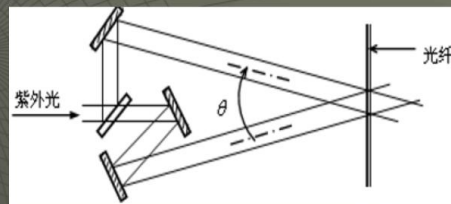


### 光纤光栅的制作方法

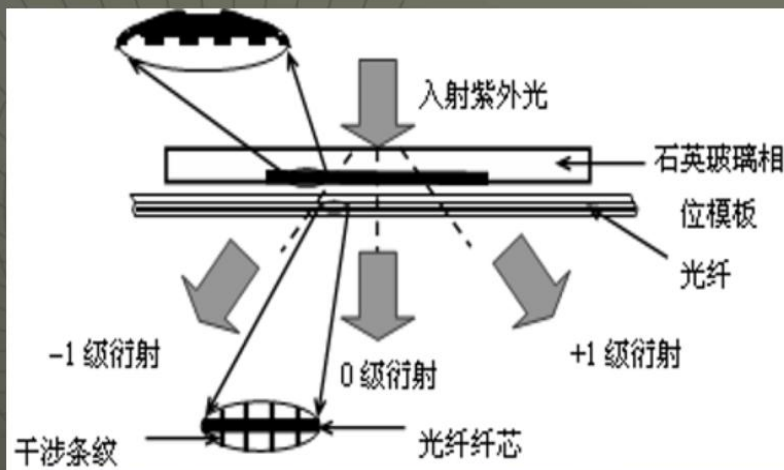
#### ➤ 驻波法

由Hill最早提出的写入光纤Bragg光栅的一种方法，他把写入光从光敏光纤的一端入射，当光传播到光敏光纤的另一端面时发生反射，入射光与反射光相干叠加在相干区域内形成驻波，从而由于光敏光纤的光折变效应引起折射率分布的改变，导致折射率的周期性调制而产生光栅。这种光栅的缺点是它的谐振波长与写入光波长相同，不易改变。

#### ➤ 侧向写入法

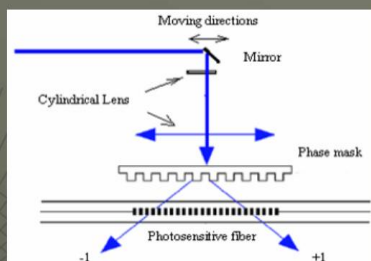


#### ➤ 位相模板写入法





## ➤扫描写入法



## ➤逐点写入法

逐点写入法适合于Bragg光栅和长周期光栅的写入，写入原理类似于扫描写入。通过透镜把光斑聚焦成微米量级（或更小）的小光斑，不通过任何模板直接在光敏光纤上写入光栅。如果使用CO<sub>2</sub>激光器，则可以在光纤表面产生永久性损伤，从而形成光栅。



## 光纤光栅传感器的弹性敏感体

光纤光栅传感器能够对温度、应变、位移、压力、振动、加速度、压强、扭矩、电流、电压、磁场、频率、浓度等众多参数进行测量。然而，光纤光栅本身只对温度和应变敏感，要实现对其它参数或者复杂机械结构的参数进行测量就需要借助于弹性敏感体。弹性敏感体主要由弹性敏感元件和光纤光栅两部分组成，光纤光栅通常通过胶黏剂粘贴或者其它方式固定在弹性敏感元件上。光纤光栅传感器工作过程中，通过弹性敏感元件来感受力、压力、力矩、振动、温度等被测参数，并由它转换为光纤光栅的应变、位移等，从而得到光纤光栅的波长变化量与被测参数之间的某种对应关系。

常用的弹性敏感元件有空心或实心圆柱、悬臂梁、简支梁、扭转棒、平膜片、波纹管、弹簧管等。这些弹性敏感元件通过适当的方式与光纤光栅进行组合设计就可以形成满足不同参数测量的弹性敏感体。



**刚度**是弹性敏感元件在受外力作用下抵抗变形的能力

$$K = \lim_{\Delta w \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta F}{\Delta w} \right) = \frac{dF}{dw}$$

**灵敏度**是刚度的倒数，是弹性元件在单位力作用下所产生的变形

$$S = \frac{dw}{dF}$$

在光纤光栅传感器设计中，有时会用到多个弹性元件组合在一起，当n个弹性敏感元件并联时，其灵敏度为

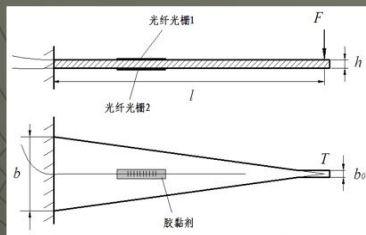
$$S = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i}}$$

n个弹性敏感元件串联时，其灵敏度为

$$S = \sum_{i=1}^n S_i$$



## 力和位移的测量



各点的应变值大小

$$\varepsilon = \frac{6l}{Ebh^2} F$$

中心波长为1310nm的光纤光栅，1个微应变约对应1pm的波长变化。假设梁表面到光纤光栅的应变传递率为1

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = \frac{6 \times 10^6 l}{Ebh^2} F - \left( -\frac{6 \times 10^6 l}{Ebh^2} F \right) = 1.2 \times 10^7 \frac{l}{Ebh^2} F$$

集中力

梁自由端的挠度

$$F = \frac{Ebh^2}{1.2 \times 10^7 l} (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2) \quad w = \frac{6l^3}{Ebh^3} F = \frac{l}{2 \times 10^6 h} (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2)$$

## 可用于智能结构的光纤传感器

### ◆ 点式传感器

- 光纤FP传感器、光纤Bragg光栅传感器等。
- 优点：传感头尺寸小 << 结构尺寸
- 缺点：只局限于检测一个很小截面内的某一参量的值。

### ◆ 积分式传感器

- 可用于测量一定范围内某一参量的平均值
  - ◆ 例如：光纤干涉仪（MZ干涉仪、Michelson干涉仪等）可用于测量光纤长度范围内应变或温度的平均值。用单根高双折射光纤构成的光纤偏振干涉仪也属于积分式传感器

### ◆ 分布式传感器

- 可沿空间位置连续测量单、多参量的传感器。
- 主要特征参量是空间分辨率和灵敏度
- 非线性效应分布式光纤传感器；高双折射光纤构成的分布式光纤压力传感器等

## 偏振调制型光纤传感器



- ◆ **机理**: 被测对象导致光纤中传输光的偏振态发生改变，利用检偏器检测这种变化得到被测对象的信息。
- ◆ **应用**: 光弹效应的声、压力或振动传感器；磁致伸缩效应的电流、磁场传感器；电致伸缩的电场、电压传感器；声光效应的各种声纳传感器等
- ◆ **优点**: 适用范围广，灵敏度非常高。
- ◆ **缺点**: 结构较复杂、需要精密检测系统。

## 内容提要

- 偏振调制光纤传感原理；
- 偏振调制型光纤传感的典型应用。

## 偏振调制原理

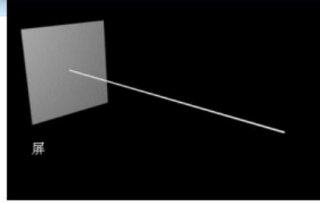
### 基本公式

$$\Delta \phi = \Delta \beta l$$

### 基本双折射效应

- 弹光效应
- 电光效应
- 磁光效应
- 声光效应
- 旋光效应

## 偏振与偏振调制



- ◆ 概念:
  - 线偏振光
    - ◆ 振动面 ( $E \times K$ )
    - ◆ 偏振面: 包含 $k$ 、垂直于振动面
  - 圆偏振光、椭圆偏振光
  - 部分偏振光、全偏振光
- ◆ 偏振调制传感器
  - 常用: 电光、磁光、弹光等物理效应进行调制。
  - 注: 光的**振动方向**通常是指电场矢量  $E$  的方向



偏振是电磁理论的一个重要概念，它反映了在空间给定点上电场强度矢量的取向随时间变化的特性。我们用电场强度矢量端点在空间描绘出的轨迹来表示，如果该轨迹是直线，称电磁波为线极化；如果轨迹是圆，则称为圆极化；如果轨迹是椭圆，则称为椭圆极化。

在一般情况下，沿 $z$ 方向传播的均匀平面波，电场的 $E_x$ 、 $E_y$ 两个分量都存在，这两个分量的振幅和相位不一定相同，将它们分别表示为

$$\begin{aligned} E_x &= E_{x0} \cos(\alpha t - kz) \\ E_y &= E_{y0} \cos(\alpha t - kz + \phi_0) \end{aligned}$$

为分析方便起见，在上式中设 $E_x$ 分量的初相为零。



我们分三种情况讨论。

### ①线偏振

为分析简单起见，取 $z=0$ （ $xoy$ 平面）。线偏振的条件是： $E_x$ 、 $E_y$ 相位相同或相反，即 $\phi_0=0$ 或 $\phi_0=180^\circ$ ，此时合成电场

$$E = \sqrt{E_{x0}^2 + E_{y0}^2} \cos \omega t$$

合成电场与 $x$ 轴的夹角

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{E_y}{E_x} = \tan^{-1} \frac{E_{y0}}{E_{x0}} = \text{常数}$$

虽然合成电场的大小随时间变化，但其矢量端轨迹始终与 $x$ 轴保持恒定的夹角。



### ②圆偏振

圆偏振的条件是 $E_x$ 与 $E_y$ 振幅相等，相位差为 $90^\circ$ 。则

$$E_x = E_0 \cos \omega t$$

$$E_y = E_0 \sin \omega t$$

此时的合成电场

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = E_0$$

合成电场与 $x$ 轴的夹角

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{E_y}{E_x} = \omega t$$

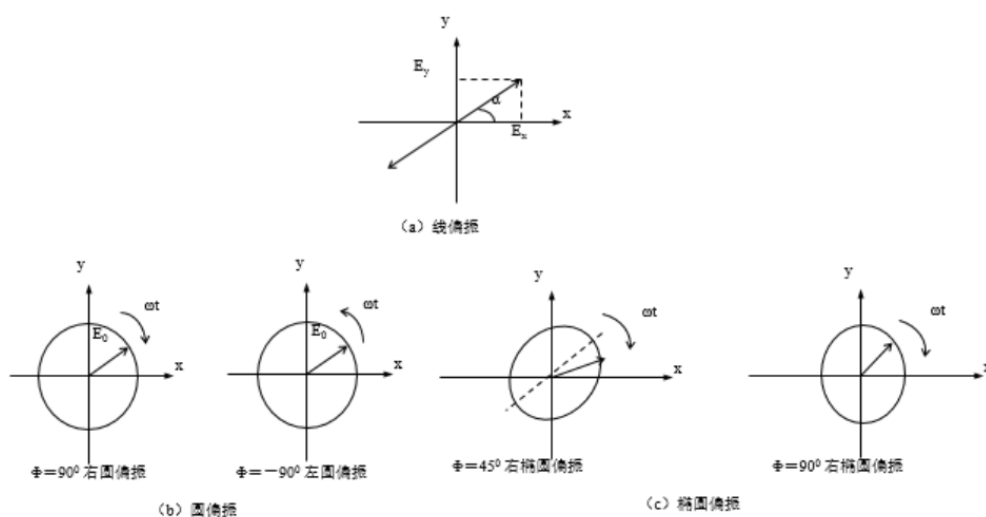
即合成电场的幅度为常数，而与 $x$ 轴的夹角随时间改变。

### ③椭圆偏振

椭圆偏振发生在 $E_x$ 与 $E_y$ 振幅和相位都不相等的情况下，此时有

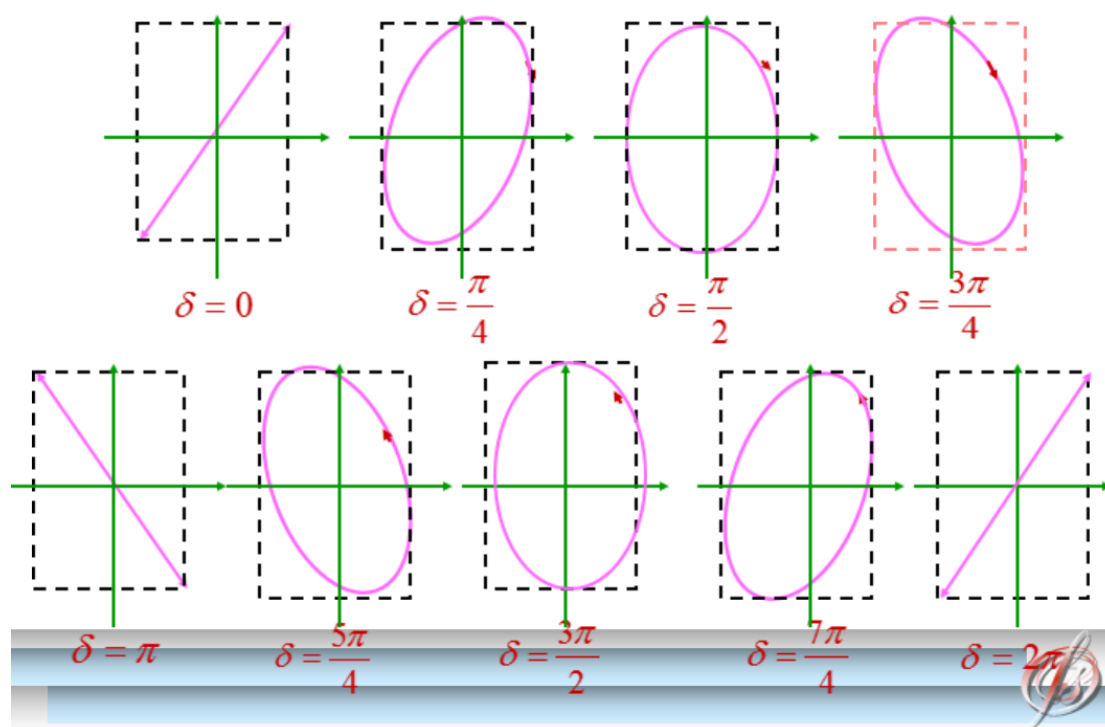
$$\frac{E_x^2}{E_{x0}^2} + \frac{E_y^2}{E_{y0}^2} - \frac{2E_x E_y}{E_{x0} E_{y0}} \cos \phi_0 = \sin^2 \phi_0$$

上式为一椭圆方程，合成矢量的矢量端在一椭圆上旋转。



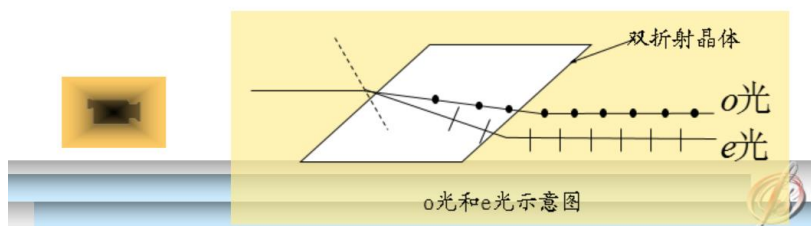
光的几种偏振方式

下图是不同的相位差对应的偏振态

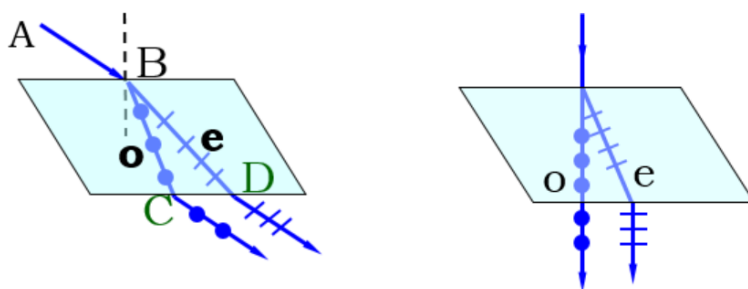


## 双折射

- ◆ 各向异性介质中，一束入射光常有被分解为两束的现象
- ◆ 注意，这种现象<sup>不是</sup>是因为不同频率的光在介质中的折射率不同而产生的。
- ◆ **o光**（寻常光）：对于任意的入射角，其入射角的正弦与折射角的正弦值比为一常数（即通常所说的折射率）；
- ◆ **e光**（非寻常光）：若其入射角的正弦与折射角的正弦值比随入射角而变化。



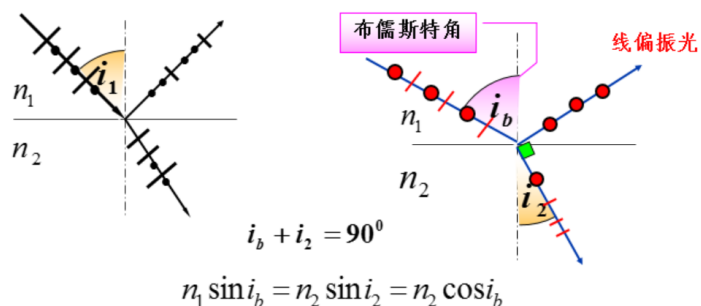
## 用双折射法获得偏振光



**o光**（寻常光）——遵守折射定律

**e光**（非常光）——不遵守折射定律

## 用反射和折射法获得偏振光



$$\tan i_b = \frac{n_2}{n_1}$$

布儒斯特定律



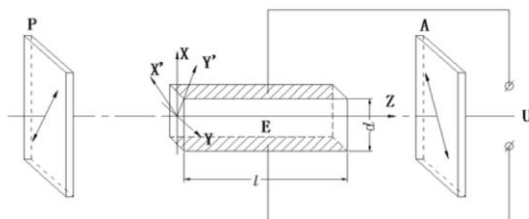
## 1 电光效应

- 某些晶体在外加电场的作用下，其折射率随外加电场的改变而发生变化的现象称为电光效应，利用这一效应可以对透过介质的光束进行幅度、相位或频率的调制，构成电光调制器。
- 电光效应分为两种类型：
  - (1) 一级电光（**泡克尔斯—Pockels**）效应，介质折射率变化正比于电场强度。
  - (2) 二级电光（**克尔—Kerr**）效应，介质折射率变化与电场强度的平方成正比。

### Pockels 效应（一次电光效应）

- 线性电光效应

#### 横向电光效应



$$\Delta n = n_0^3 r E$$

### Pockels 效应（一次电光效应）

#### 横向电光效应

$$\Delta n = n_0^3 r E$$



$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n l = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r E l = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r \left( \frac{l}{d} \right) U$$

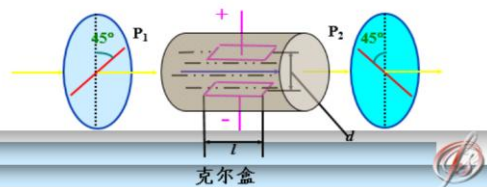
当相差  $\delta = \pi$  时，所加电压  $U = U_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^3 r} \frac{d}{l}$

$U_\pi$  称为半波电压

## Kerr二次电光效应

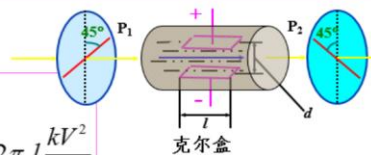
### ◆ 克尔效应 (Kerr effect) (1875年)

- 克尔盒内充某种液体，如硝基苯 ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$ )
- 不加电场→液体各向同性→ $\text{P}_2$ 不透光
- 加外电场→液体呈单轴晶体性质，光轴平行透光



### Kerr盒

$$|n_e - n_o| = kE^2$$
$$\Delta\phi_k = \frac{2\pi}{\lambda} |n_e - n_o| l = 2\pi l \frac{kV^2}{\lambda d^2}$$



- ◆  $\Delta\phi_k = \pi$ 时，克尔盒相当于半波片 -  $\text{P}_2$ 透光最强
- ◆ 硝基苯  $k = 1.44 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{V}^2$ ，设  $l = 3\text{cm}$ ， $d = 0.8\text{cm}$ ，则  $\lambda = 600\text{nm}$ ， $V_\pi \approx 2 \times 10^4 \text{ V}$
- ◆ 优点：响应时间  $\sim 10^{-9}\text{s}$  - 用于光开关、高速摄影、激光通讯、光速测距、脉冲激光系统（作为Q开关）
- ◆ 缺点：如硝基苯有毒，易爆炸，需极高纯度和高电压，故现在很少用。

## 2 旋光效应

### ◆ 晶体和溶液的旋光性

- 单轴晶体（如方解石）→ 光线沿光轴传播时不发生双折射（o光和e的传播方向和波速都一样）
- 垂直于光轴切割出一块平行平面晶片→从偏振片I透出来的线偏振光经过此晶片时偏振状态没有改变，在偏振片II之后仍然消光。
- 用石英晶体实验时发现：要使偏振片II之后消光，必须将偏振片II的透振方向向左或向右旋转一个角度 $\phi$

## 旋光效应

- ◆ 旋光现象、旋光性(optical activity)与旋光物质



- ◆ 晶体: 振动面旋转角度  $\phi$  与晶片厚度  $d$  成正比

◆

$$\phi = \alpha d \quad \alpha: \text{晶体旋光率, 与 } \lambda \text{ 有}$$

- ◆ 溶液:  $\phi$  还与溶液的浓度  $C$  成正比, 即

$$\phi = \alpha' C d \quad \alpha': \text{溶液的比旋光率}$$

- ◆ 应用: 在制糖、制药和化工等方面



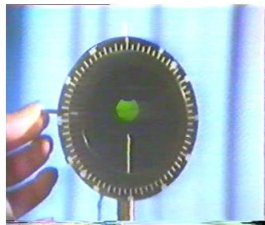
## 3 磁致旋光效应

- ◆ 磁致旋光(magnetic opticity)

- 人工方法产生旋光性法拉第旋转(Faraday rotation)
- 1846年, 法拉第发现

- ◆ 应用

- 隔离器—非互易性→即只允许光从一个方向通过, 而不能从反方向通过的光阀门。在激光的多级放大装置中



- ◆ 磁光材料

- 水、二硫化碳、食盐、乙醇等都是磁致旋光物质



### 磁光效应

### 磁致双折射

- 由外磁场引起的材料折射率分布变化的现象

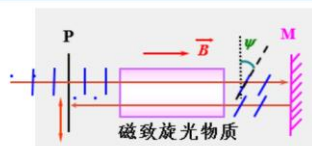
- 材料在外加磁场作用下呈现光学各向异性, 从而使通过材料的光波偏振性质发生改变。
- 磁光效应具有独特的光学非互易性, 有特殊重要的应用价值

## 法拉第效应的应用

◆ 隔离器  $\psi = 45^\circ$   $2\psi = 90^\circ$

◆ 应用很广泛:

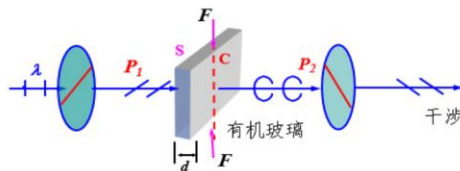
- 研究物质结构: 结构不同-其碳氢化合物的法拉第旋转效应也不同
- 测电流和磁场: 在电工测量中, 用来测电流和磁场, 特别可制造用于测量超高压电网电流的光纤电流传感器
- 磁光调制: 光通信技术中, 应用磁致旋光效应, 使信号电流产生的光振动面旋转, 转化为光的强度变化, 这就是磁光调制



## 4 弹光效应

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\phi}{2} = I_0 \sin^2 \left( \frac{\pi KPL}{\lambda} \right)$$

◆ 在垂直于 $k$ 方向上施加应力(内应力或外来的机械应力) → 双折射



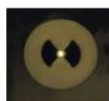
- ◆ 片状、插在两偏振片之间, 不同地点因  $(n_o - n_e)$  不同会引起o光和e光不同的相位差  $\delta \rightarrow$  干涉图样。
  - 应力越集中地方, 各向异性越强, 干涉条纹越细密。
  - 在白光照射下, 则显示出彩色的干涉图样。
- ◆ 可构成压力、振动、位移等光纤传感器。

光纤应力双折射

◆  $\nu$ : 泊松比

$$\Delta n = \Delta n_x - \Delta n_y = \frac{n^3}{2E} (1 + \nu) (p_{12} - p_{11}) (\sigma_x - \sigma_y)$$

其他应用



◆ 残余内应力

例题

已知: SMF 光纤  $E = 7.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,  $\nu = 0.17$ ,  $p_{11} = 0.121$ ,  $p_{12} = 0.270$ ,  $n = 1.5$ ,

求: 该SMF在50000Pa的压应力作用下, 对1550nm的光信号引起的相移。

$$\Delta n = 2.1 \times 10^{-7}$$

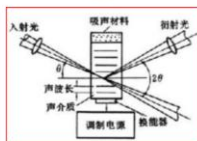
$$\Delta \delta = 48.83^\circ / \text{m}$$

## 5 声光效应

### 声致双折射

#### ● 由外界声场引起的材料折射率分布变化的现象

➤ 超声波通过介质时会造成介质的局部压缩和伸长而产生弹性应变,该应变随时间和空间作周期性变化,使介质出现疏密相间的现象,如同一个相位光栅。当光通过这一受到超声波扰动的介质时就会发生衍射现象,这种现象称之为声光效应。



➤ 衍射光偏转角随超声波频率的变化现象称为声光偏转;  
衍射光强度随超声波功率而变化的现象称为声光调制。

➤ 声光调制器件,声光偏转器件,声光调Q开关,可调谐滤波器等等。

◆ 声光调制器通常由电声换能器、声光介质和吸声装置组成。

◆ 声光调制具有驱动功率低、光损耗小、消光比高等优点。

54

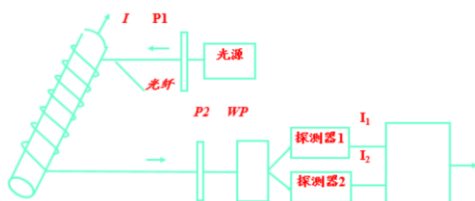
## 2 应用 光纤电流传感器

法拉第电流传感器是利用光纤的磁光效应实现电流测量的,按调制参数分类,则属于偏振调制型。磁光效应,又称法拉第(Faraday)效应,是指某些物质在外磁场的作用下,使通过它的线偏振光的偏振方向发生偏转。设法拉第材料的长度为 $l$ ,沿长度方向施加的外磁场强度为 $H$ ,则线偏振光通过它后偏振方向旋转的角度为

$$\theta = V_d l H$$

55

### ❖ 高压传输线用的电流传感器



将光纤绕在被测导线上,设圈数为 $N$ ,导线中通过的电流为 $I$ ,由安培环路定律,距导线轴心为 $R$ 处的磁场为:

$$H = \frac{I}{2\pi R}$$

56



由以上两式可得偏转角

$$\theta = V_d \frac{l}{2\pi R} I$$

绕在导线上的光纤长度为:  $l = 2\pi R N$  , 代入上式得

$$\theta = V_d * N * I$$

通过光纤的光偏振面偏转角与被测电流及光纤的匝数成正比, 与光纤圈半径大小无关。

由于探测器不能直接检测光的偏振态, 需要将光偏振态的变化转换为光强度信号。一种检测方法采用 Wollaston 棱镜 WP, 由光源发射的激光经起偏器 P1 变为线偏振光进入传感光纤, 在输出端将检偏器 P2 输出的

57

正交偏振分量在空间上分成两路输出, 分别被探测器1与探测器2接收。探测器1与探测器2接收的光强信号分别为

$$I_1 = I_0 \cos^2(\pi/4 - \theta)$$

$$I_2 = I_0 \sin^2(\pi/4 - \theta)$$

经信号处理可得到偏振面的偏转角

$$\theta = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left( \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right)$$

该解调方法的特点是可以有效消除光源强度波动对测量结果的不利影响。

58

## 光纤电流传感器

- ◆ 振动面偏转角仅与电流  $I$  有关

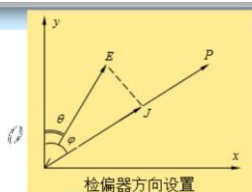
- ◆ 设:

- 载流导线中的电流  $I=0$  时, 线偏振光振动方向在检偏器处的与  $y$  轴平行, 检偏器  $P$  (普通检偏器) 的方位为  $\phi$ ;
- $I \neq 0$  时的方位为  $\theta$ , 在  $P$  上的投影 (即光探测器的输出信号强度) 为  $J$ , 则

$$J = E^2 \cos^2(\phi - \theta) = \frac{E^2}{2} [1 + \cos(2\phi + 2\theta)]$$

- $\phi = \pm 45^\circ$  时, 检测灵敏度最高

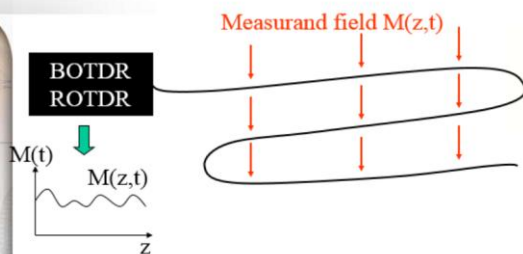
$$J = \frac{E^2}{2} [1 + \sin(2\theta)]$$



# 分布式光纤传感器

Fiber Optic Sensors

## 什么是分布式传感？



- 沿光纤铺设区域，连续、大规模的测量方式

2025年5月6日

2

## 分布式光纤传感器的分类

- 反射法 (OTDR/ROTDR/BOTDR)
- 偏振光时域反射法 (polarization OTDR: POTDR)
  - 利用后向散射光的偏振态信息
- 波长扫描法 (wavelength scanning: WLS)
  - 用白光照射保偏光纤，运用快速Fourier算法来确定模式耦合系数的分布；
- 干涉法
  - 各种形式的干涉装置解调干涉光路中相位

2025年5月6日

3

## 内容提要

- 反射式
  - 基于OTDR技术和非线性效应
    - ROTDR
    - BOTDR
- 干涉型（积分式）  
FP准分布式



2025年5月6日

4

## 准分布式传感器

- 波长扫描和干涉式
  - 传感器仍然以测点的形式存在
  - 主要类型
    - 光纤光栅
    - 干涉调制型的光纤F-P腔传感器
  - 复用技术取得突破性进展

2025年5月6日

6

## 分布式传感的主要特点

- ☞ 空间连续性
  - ☞ 光纤铺设沿线区域—被测区域
  - ☞ 连续测量距离~80km
- ☞ 光纤本身兼备传感与信号传输功能
- ☞ 工程施工方便
- ☞ 昂贵

2025年5月6日

7

## 分布式传感的研究热点与产品

- 研究热点
  - 光纤光栅 (FBG: fiber Bragg grating)
  - 分布式传感系统 (OTDRs: optical time domain reflectometers)
    - ROTDRs: Raman OTDR
    - BOTDRs: Brillouin OTDR
- 现有产品

2025年5月6日

8

## 概念

- 什么是拉曼光纤温度传感?
  - 光纤 = 传感器
- 分布式?
  - 例: 2km 光纤 → 沿2km路径, 光纤铺设区域的温度分布

ROTDR

## 优点

- 沿光纤铺设区域的温度监测
  - 连续, 长距离 温度场分布
- 优越的抗EMI性能
- 光纤 → 既是数据传输载体、又是传感器
- 轻巧 → 便于安装

ROTDR

## 类型

- 基于布里渊光时域反射
  - Brillouin optical time domain reflectometry : BOTDR
- 基于布里渊光时域分析
  - Brillouin optical time domain analysis: BOTDA
- 基于布里渊光频域分析技术
  - Brillouin optical frequency domain analysis : BOFDA

2025年5月6日

33

## Brillouin频移

- Brillouin频移

$$\nu_B = \frac{2\nu_0}{c} n v \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$\nu_0 = c/\lambda_0$  为入射光频率;  $n$  为介质折射率;  $c$  为真空中光速;  $v$  为介质中声速;  $\theta$  为入射光与散射光之间的夹角。

后向散射光沿光纤原路返回, 即  $\theta = \pi$

$$\nu_B = \frac{2\nu_0 n v}{c}$$

2025年5月6日

34

- 声速的表示

$$v = \sqrt{\frac{(1-k)E}{(1+k)(1-2k)\rho}}$$

$E$ 、 $k$ 、 $\rho$  分别为介质的杨氏模量、泊松比和密度

- 结论: 背向布里渊散射频移  $\nu_B$  只由介质的声学特性和弹性力学特性决定
  - 实验发现, 布里渊功率随温度的上升而线性增加, 随应变增加而线性下降
  - 布里渊散射信号的布里渊频移和功率与光纤所处环境温度和所承受的应力在一定条件下呈线形变化关系

2025年5月6日

35



## 几个重要参数

- 精度
  - 标准偏差 ( $2\sigma$ ): 在无应力状态下, UV被覆单模光纤100个数据的平均应力分布图
  - 标准偏差 ( $2\sigma$ ) - 在特定应力精度 ( $\pm 0.003\%$  或  $\pm 0.004\%$ )、100个数据的平均应力分布图, 平均时间= 214
  - 扫描频率范围: 10MHz (5 MHz, 脉宽 100ns or 200ns)
- 重复性
  - UV被覆单模光纤在无应力状态下, 10次测试的平均应力

2025年5月6日

43

## 为什么考虑光缆的应力分布?

- 以下过程中的应力残留:
  - 光缆制造工艺
  - 光缆安装施工过程, 尤其是固定于电力铁塔之上的OPGW 光缆
- 在应力集中区域, 光缆将会很快脆化, 受力点在极短的时间内断裂



Communication will blackout - large loss !!

2025年5月6日

45

## 2 光纤F-P传感器的类型

- 类型
  - 本征型: intrinsic Fabry-Perot interferometer, IFPI
  - 非本征型: extrinsic Fabry-Perot interferometer, EFPI
  - 线型复合腔: in-line Fabry-Perot, ILFE
- 解调方法
  - 强度解调
  - 相位解调
  - 多传感器复用技术

2025年5月6日

61