



七章光纤传感检

测技术(第2版)精品

光纤的原理

光纤之父——高锟

神奇的光纤

光纤革命

光纤通信进展

光纤传感器始于1977年，目前已进入研究与应用并重阶段。

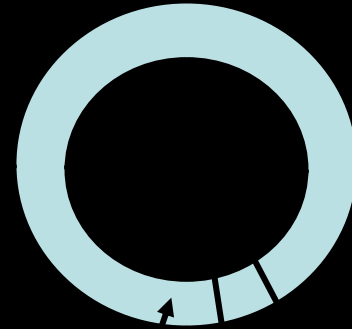
主要优点：

- ① 灵敏度高、电绝缘性能好、抗电磁干扰、可挠性强、可实现不带电的全光型探头。
- ② 频带宽、动态范围大。
- ③ 可用很相近的技术基础构成传感不同物理量的传感器
- ④ 便于与计算机和光纤传输系统相连，易于实现系统的遥测和控制
- ⑤ 可用高温、高压、强电磁干扰、腐蚀等恶劣环境。
- ⑥ 结构简单、体积小、重量轻、耗能少。

7.1 光纤传感器的基础

光纤波导的结构

纤芯 包层 一次涂覆层 套层

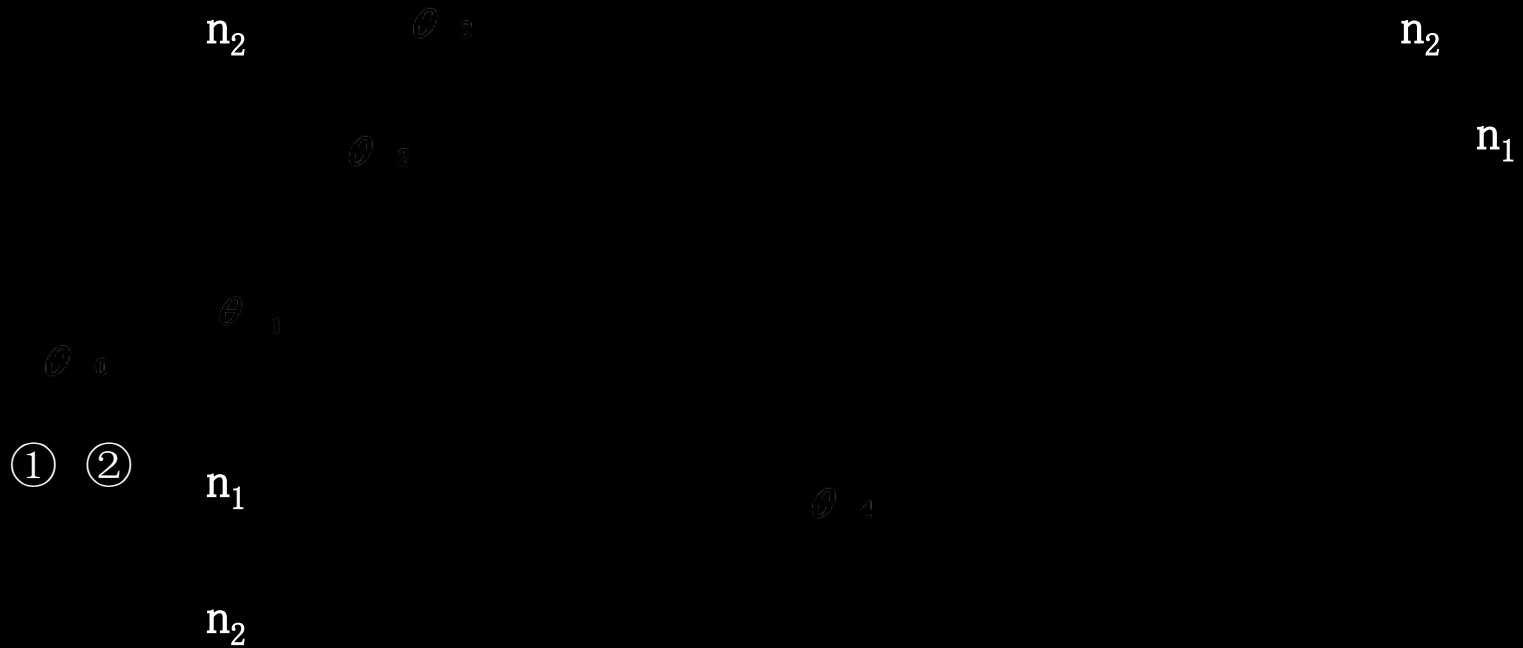


套层 一次涂覆层 包层 纤芯

多层介质结构:

- 1、纤芯：石英玻璃，直径5-75um，材料以二氧化硅为主，掺杂微量元素。
- 2、包层：直径100-200um，折射率略低于纤芯。
- 3、涂敷层：硅酮或丙烯酸盐，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。

光纤的光波导原理



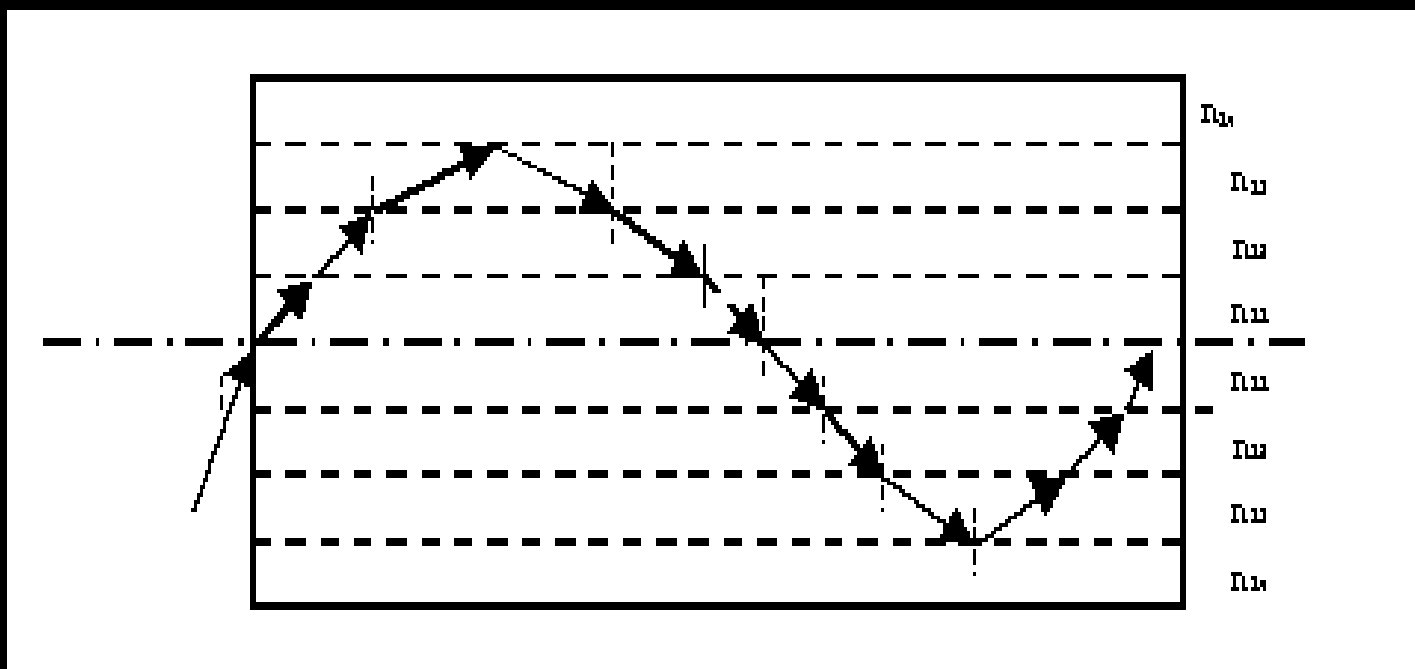
光纤的临界角

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

对应光纤的入射角临界值为:

$$n_0 \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA$$

渐变光纤的导光原理示意图



在渐变光纤中光线传播的轨迹近似于正弦波。

光纤的分类

按光纤组成材料划分

- 石英系列光纤（以 SiO_2 为主要材料）
- 多组分光纤（材料由多组成成分组成）
- 液芯光纤（纤芯呈液态）
- 塑料光纤（以塑料为材料）

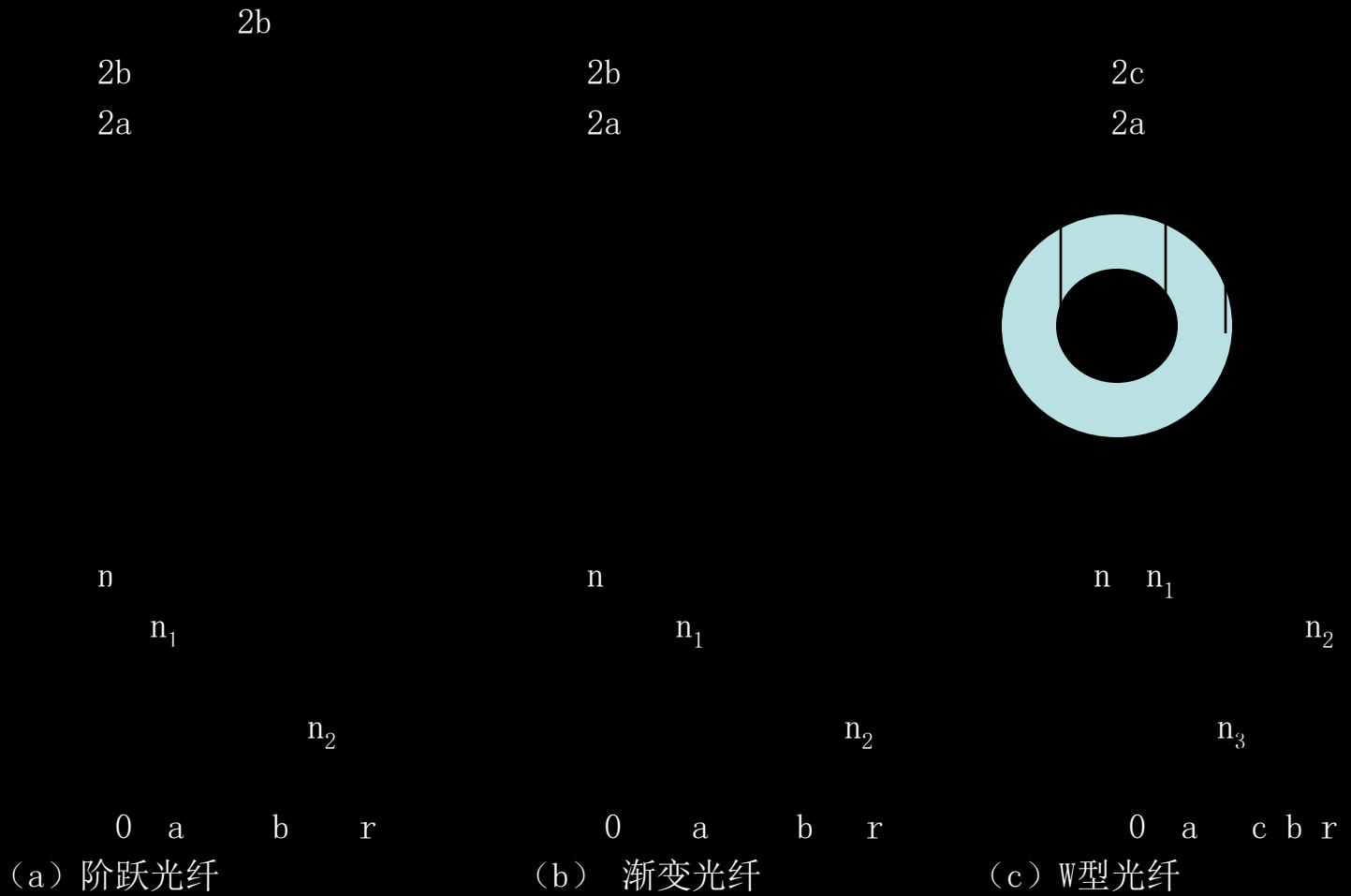
光纤种类 按光纤纤芯折射率分布划分

- 阶跃型光纤（SIF）
- 渐变型光纤（GIF）
- W型光纤

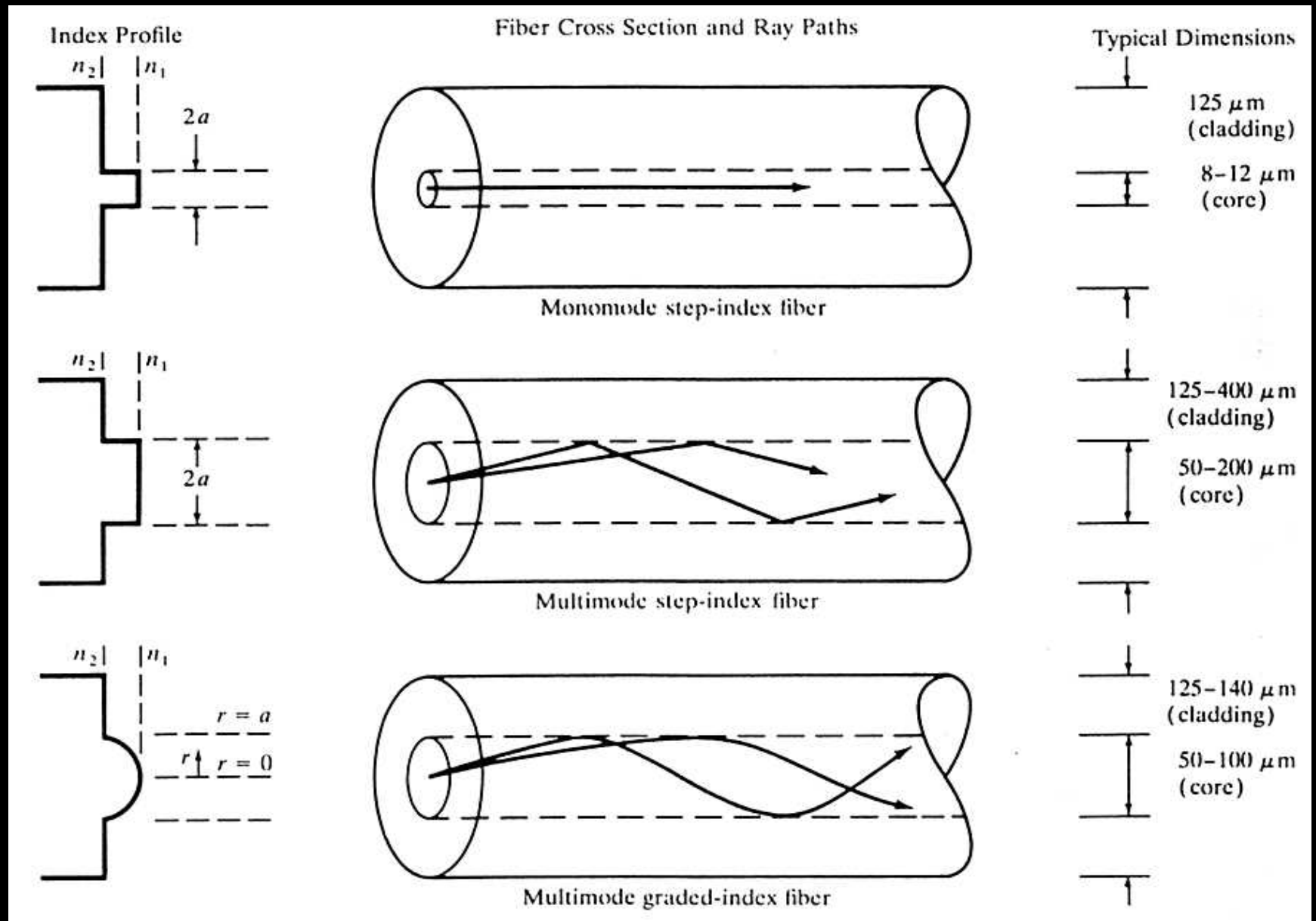
按光纤传输模式数划分

- 单模光纤（SMF）
- 多模光纤（MMF）

光纤的纤芯折射率剖面分布



光纤的类型

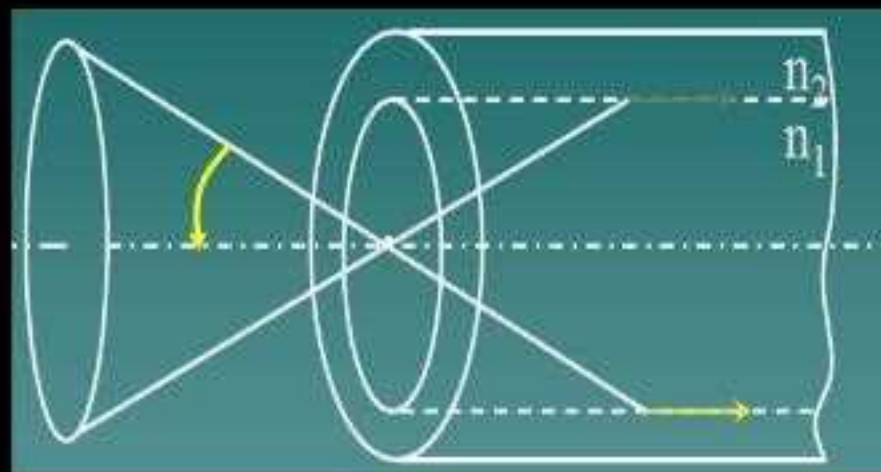


光纤中的重要参数

1、数值孔径 (NA, Numerical Aperture)

当光线在纤芯与包层界面上发生全反射时，相应的端面入射角为光纤波导的孔径角（或端面临界角）。即只有光纤端面入射角大于的光线才能在光纤中传播，故光纤的受光区域是一个圆锥形区域，圆锥半锥角的最大值就等于孔径角。

为表示光纤的集光能力大小，定义光纤波导孔径角的正弦值为光纤的数值孔径 (NA)，即：



光纤参数数值孔径的意义??

光纤中的重要参数

2、光纤中的模式(Fiber Mode)

电磁波的传播遵从麦克斯韦方程，而在光纤中传播的电磁场根据由光纤结构决定的边界条件，可求得满足波动方程的特定的离散的解，而某一个解代表许多允许沿光纤波导传播的波，每个允许传播的解称为光纤的模式，每个波具有不同的振幅和传播速度。

光纤中可能传播的模式有**横电波、横磁波和混合波**。

(1) 横电波 TE_{mn} ：纵轴方向只有磁场分量；横截面上有电场分量的电磁波。中下标 m 表示电场沿圆周方向的变化周数， n 表示电场沿径向方向的变化周数。

(2) 横磁波 TM_{mn} ：纵轴方向只有电分量；横截面上有磁场分量的电磁波。

(3) 混合波 HE_{mn} 或 EH_{mn} ：纵轴方向既有电分量又有磁场分量，是横电波和横磁波的混合。

无论哪种模式，当 m 和 n 的组合不同，表示的模式也不同。

光纤中的重要参数

3、光纤的归一化频率V

归一化频率是为表征光纤中所能传播的模式数目多少而引入的一个特征参数。

其定义为：

其中， r ——是光纤的纤芯半径；

λ ——是光纤的工作波长；

n_1 和 n_2 ——分别是光纤的纤芯和包层折射率；

k_0 ——真空中的波数；

Δ ——光纤的相对折射率差。

归一化频率越大，光纤所允许传播的模式越多，当 $V < 2.405$ 时，光纤中只允许一个模式传播，即基模。

光纤中的重要参数

4、传播常数 β

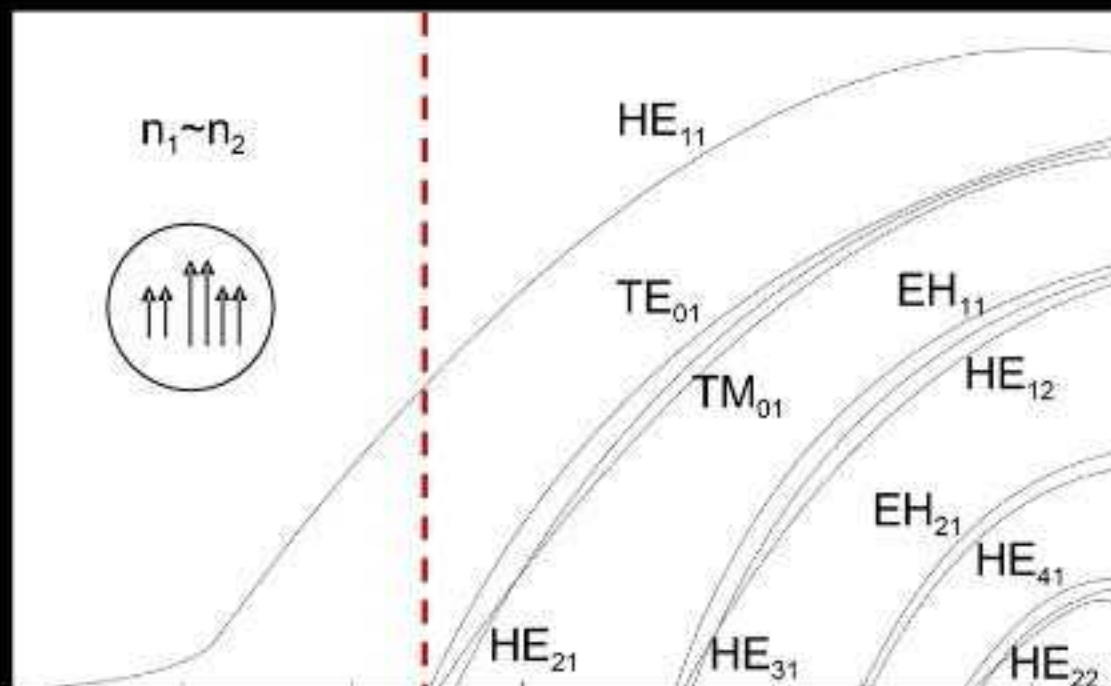
传播常数 β 是描述光纤中各模式传输特性的一个参数，光纤中各模式的传输或截止都可以由该参数决定。

光纤通信中信息就是由传导模传送的。传导模的传播常数是限制在纤芯到包层之间的，即

当 $\beta < k_0 n_2$ 时，包层中的电磁场不再衰减，而成为振荡函数，这时传导模已不能集中于光纤纤芯中传播，此时的模式称为辐射模，即传导模截止。

当 $\beta = k_0 n_2$ 时，传导模处于临界截止状态，光线在纤芯与包层的界面掠射。

归一化传播常数 β/k_0 与归一化频率 V 的关系曲线



模式特性

| V | 模式 | 导模数 |
|--------------|-----------------------------|-----------|
| 0--2.405 | HE_{11} | 2 |
| 2.405--3.832 | $HE_{21}, TE_{01}, TM_{01}$ | $2+4=6$ |
| 3.832--5.136 | $HE_{12}, HE_{31}, EH_{11}$ | $6+6=12$ |
| 5.136--5.520 | HE_{41}, EH_{21} | $12+4=16$ |
| 5.520--6.380 | $HE_{22}, HE_{02}, TM_{02}$ | $16+4=20$ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |

单模传输条件

当 $0 < V < 2.405$ 时，光纤中除主模（或基模） HE_{11} 模以外，其余模式均截止，此时可实现单模传输。

多模传输的数目

对于阶跃型光纤，光纤中的传输模式数为 $N_s = V^2/2$

对于渐变型光纤，光纤中的传输模式数为 $N_s = V^2/4$

5、截止波长 λ_c

截止波长是单模光纤特有的参数，对应于第一高阶模的归一化截止频率 $V_c=2.405$ 时的波长。

$$\lambda_c = \frac{2\pi \cdot r}{V_c} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi \cdot r}{V_c} n_1 \sqrt{2\Delta}$$

光纤的损耗特性

损耗的定义

当光在光纤中传输时，随着传输距离的增加，光功率逐渐减小，这种现象即称为光纤的损耗。损耗一般用损耗系数 α 表示：

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{P_i}{P_o} \quad (\text{单位: dB/km})$$

损耗大小影响光纤的传输距离长短和中继距离的选择。

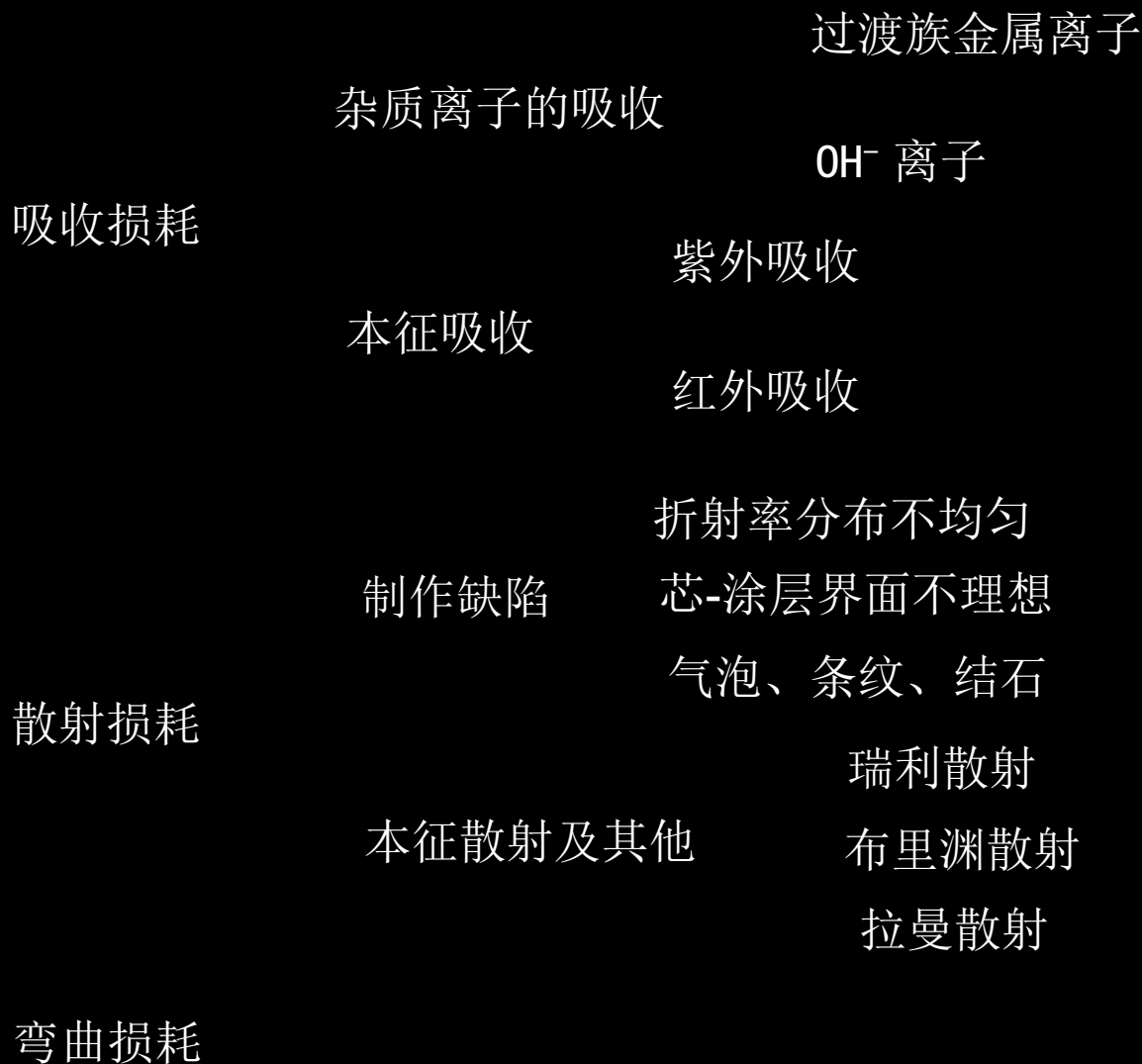
损耗的种类

- 吸收损耗：来源于光纤物质和杂质的吸收作用；
- 散射损耗：光纤材料的不均匀性和尺寸缺陷，如瑞利散射；
- 其他损耗：如光纤弯曲也引起散射损耗。

部分光纤传感器利用了光纤的损耗特性。

光纤的损耗

损耗



光纤的色散特性

色散的定义

光纤的色散是在光纤中传输的光信号，随传输距离增加，由于不同成分的光传输时延不同引起的脉冲展宽的物理效应。色散主要影响系统的传输容量，也对中继距离有影响。色散的大小常用时延差表示，时延差是光脉冲中不同模式或不同波长成分传输同样距离而产生的时间差。

色散的种类

- **模式色散**：**模式色散**是由于光纤不同模式在同一波长下传播速度不同，使传播时延不同而产生的色散。只有多模光纤才存在模式色散，它主要取决于光纤的折射率分布。
- **材料色散**：**材料色散**是由于光纤的折射率随波长变化而使模式内不同波长的光时间延迟不同产生的色散。取决于光纤材料折射率的波长特性和光源的谱线宽度。
- **波导色散**：**波导色散**是由于波导结构参数与波长有关而产生的色散。取决于波导尺寸和纤芯包层的相对折射率差。

波导色散和**材料色散**都是模式的本身色散，也称**模内色散**。对于多模光纤，既有模式色散，又有模内色散，但主要以模式色散为主。梯度型光纤中模式色散大为减少。

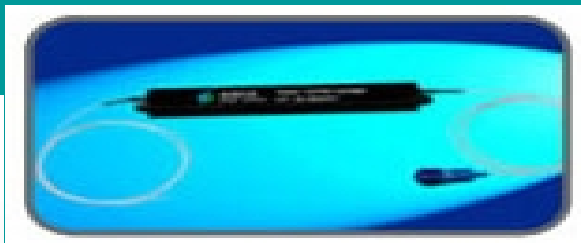
而单模光纤不存在模式色散，只有材料色散和波导色散，由于波导色散比材料色散小很多，通常可以忽略。采用激光光源可有效减小材料色散的影响。

7.1.4 光纤传感器的分类

光纤传感器一般可分为两大类：

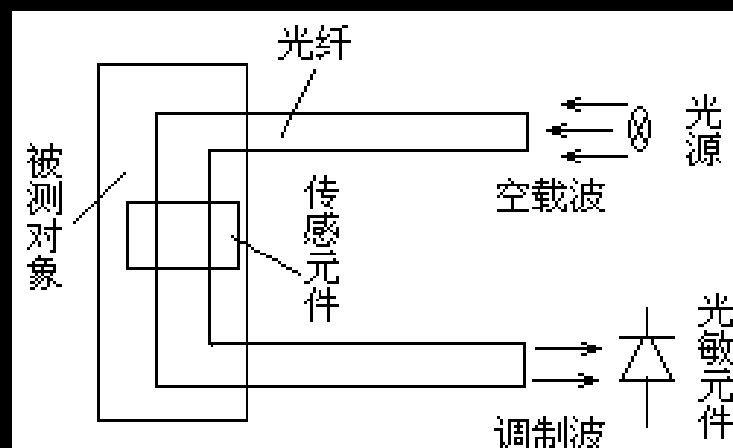
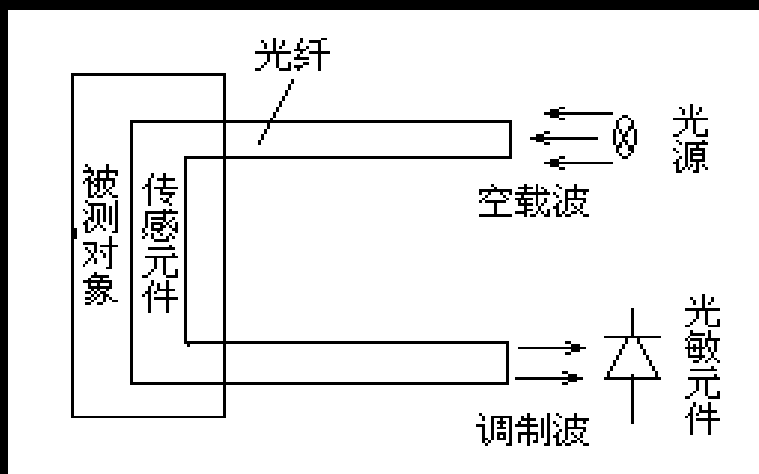
一类是**功能型传感器**（Function Fiber Optic Sensor），又称**FF型**光纤传感器；利用光纤本身感受被测量变化而改变传输光的特性，光纤既是**传光元件**，又是**敏感元件**。

另一类是**非功能型传感器**（Non-Function Fiber Optic Sensor），又称**NF型**光纤传感器。利用其他敏感元件感受被测量的变化，光纤仅作为光信号的**传输介质**。



功能型光纤传感器

这类传感器利用光纤本身对被测对象具有敏感能力和检测功能，光纤不仅起到**传光作用**，而且在被测对象作用下，如光强、相位、偏振态等**光特性得到调制**，调制后的信号携带了被测信息。



非功能型光纤传感器

传光型光纤传感器的光纤只当作传播光的媒介，待测对象的调制功能是由其它光电转换元件实现的，光纤的状态是不连续的，光纤只起传光作用。

光纤传感器的分类列表

| 传感器 | | 光学现象 | 被测量 | 光纤 | 分类 |
|--------|-------------|-----------|-----------------|-------|--------------|
| 干涉型 | 相位调制光线传感器 | 干涉 (磁致伸缩) | 电流、磁场 | SM、PM | a |
| | | 干涉 (电致伸缩) | 电场、电压 | SM、PM | a |
| | | Sagnac效应 | 角速度 | SM、PM | a |
| | | 光弹效应 | 振动、压力、加速度、位移 | SM、PM | a |
| | | 干涉 | 温度 | SM、PM | a |
| 非干涉型 | 强度调制光纤温度传感器 | 遮光板遮断光路 | 温度、振动、压力、加速度、位移 | MM | b |
| | | 半导体透射率的变化 | 温度 | MM | b |
| | | 荧光辐射、黑体辐射 | 温度 | MM | b |
| | | 光纤微弯损耗 | 振动、压力、加速度、位移 | SM | b |
| | | 振动膜或液晶的反射 | 振动、压力、位移 | MM | b |
| | | 气体分子吸收 | 气体浓度 | MM | b |
| 干涉型 | 偏振调制光纤温度传感器 | 法拉第效应 | 电流、磁场 | SM | b,a |
| | | 泡克尔斯效应 | 电场、电压、 | MM | b |
| | | 双折射变化 | 温度 | SM | b |
| | | 光弹效应 | 振动、压力、加速度、位移 | MM | b |
| | | 干涉型 | 频率调制光纤温度传感器 | 多普勒效应 | 速度、流速、振动、加速度 |
| 受激喇曼散射 | 气体浓度 | | | MM | b |
| 光致发光 | 温度 | | | MM | b |

注：MM多模；SM单模；PM偏振保持；a、b功能型、非功能型

7.2 光纤的光波调制技术

强度调制

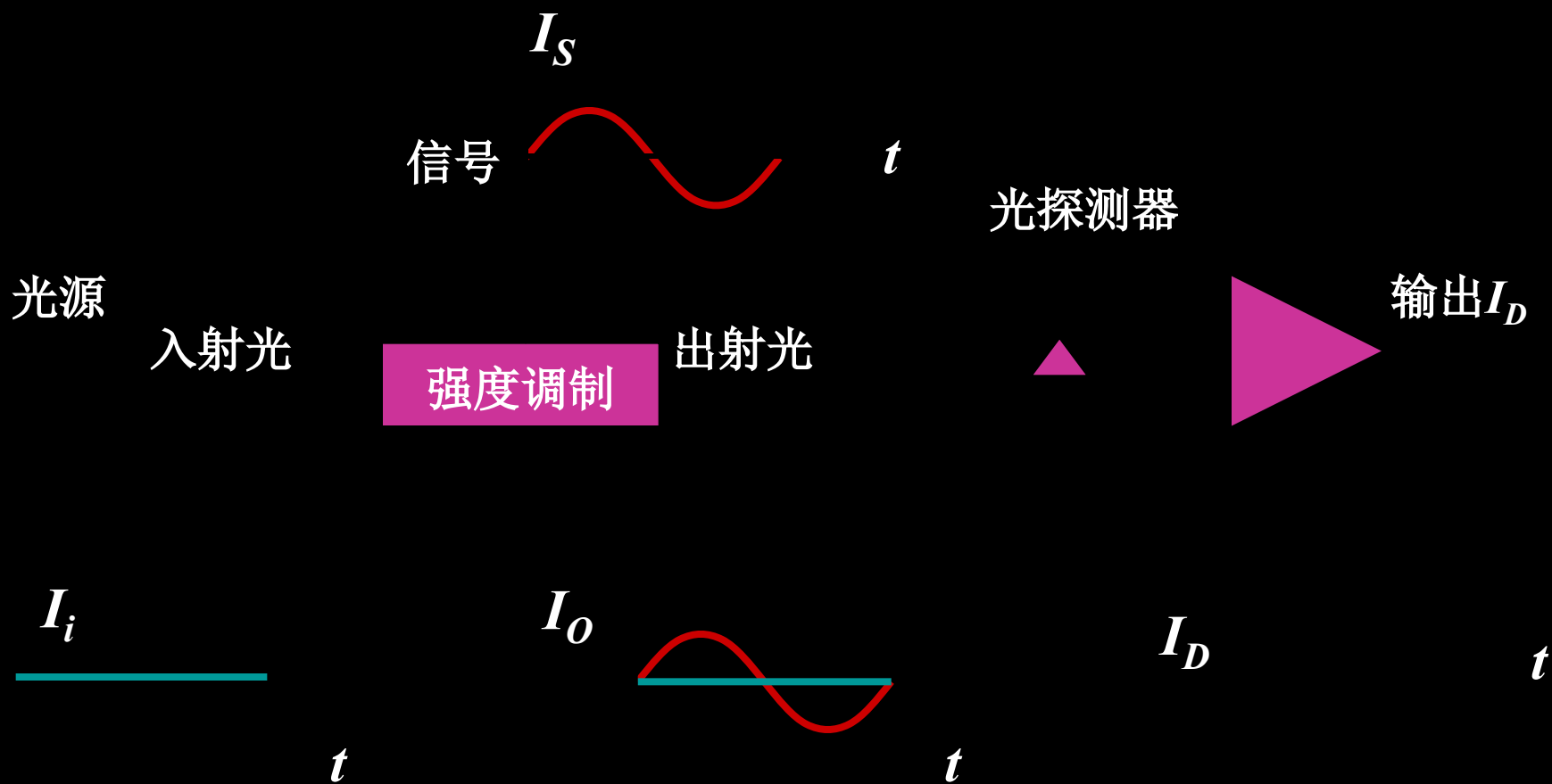
相位调制

偏振调制

频率调制

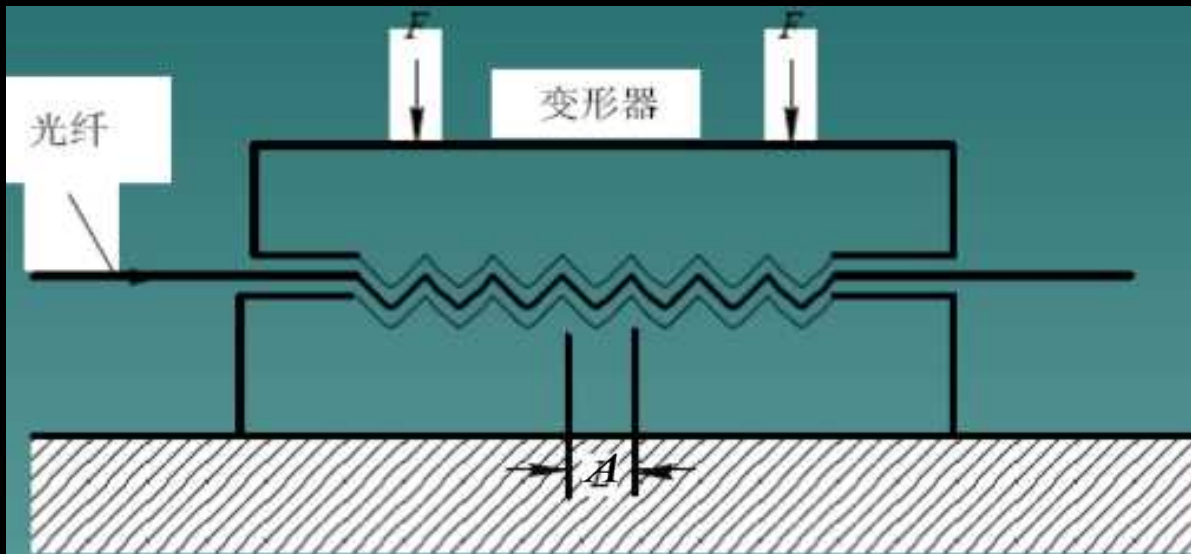
波长调制

1、强度调制：



强度调制原理

强度调制是利用被测对象的变化引起敏感元件的折射率、吸收或反射等参数的变化，而导致光强度发生变化来实现敏感测量的。



调制原理：

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 = 2\pi/A$$

$$A \leftarrow F$$

2、偏振调制

光是一种横波。光振动的电场矢量 E 和磁场矢量 H 和光线的传播方向 s 正交。按照光的振动矢量 E 、 H 在垂直于光线平面内矢量轨迹的不同，又可分为线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光和部分偏振光。偏振调制就是利用光偏振态的变化来传递被测对象的信息。

调制原理：

- 普克尔Pockels效应(电光效应)
- 法拉第磁光效应
- 光弹效应

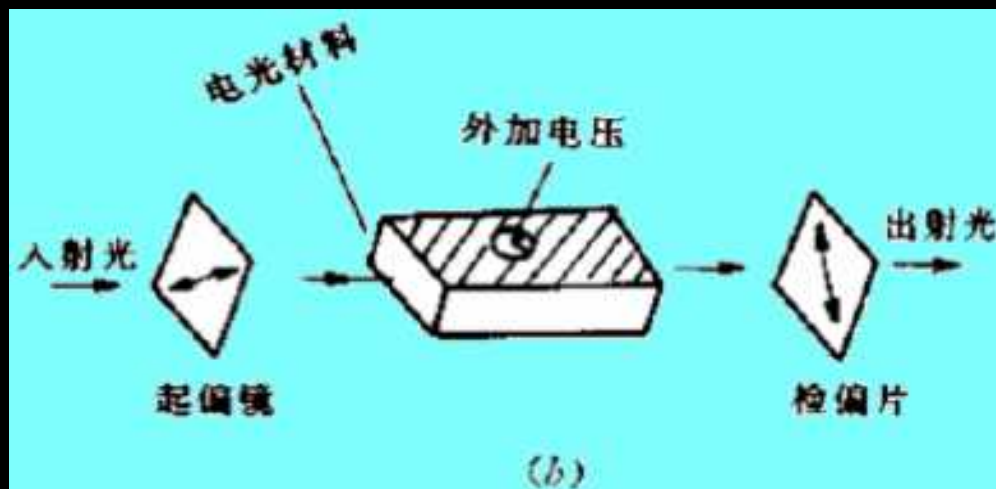
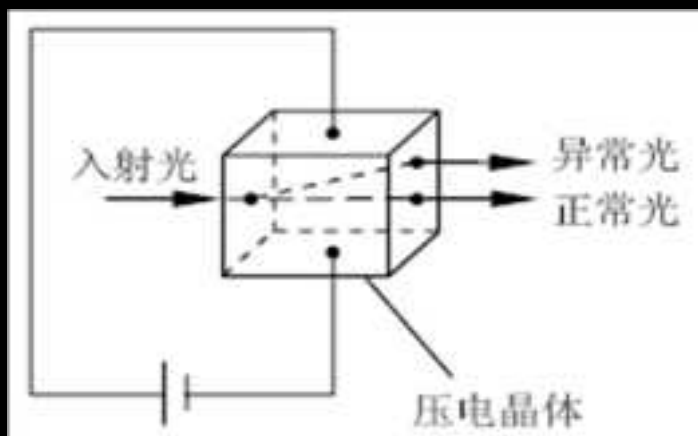
解调原理：检偏器

普克尔效应（电光效应）

当压电晶体受光照射，并在与光照正交的方向上加以高压电场时，晶体将呈现双折射现象，这种现象被称为Pockels效应，如下图所示。并且，这种双折射正比于所加电场的一次方在晶体中，两正交的偏振光的相位变化为

$$\varphi = \frac{\pi n_0^3 r_e U L}{\lambda_0 d}$$

其中： n_0 —正常折射率； r_e —电光系数； U —加在晶体片上的横向电压； λ —光波长； L —光传播方向晶体长度； d —电场方向晶体厚度。



Pockels效应及应用

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/195003300300011124>