



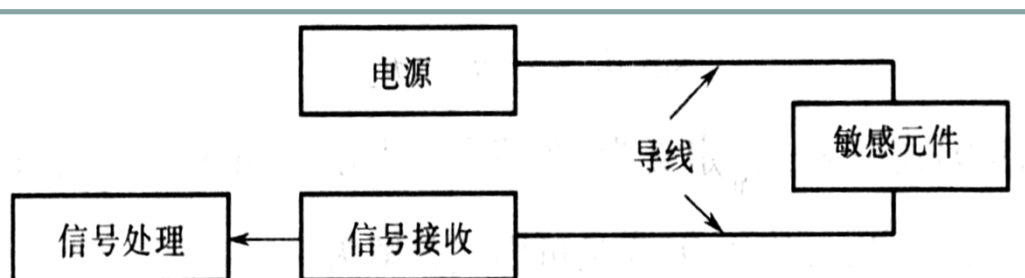
传感技术

— 光纤式传感器

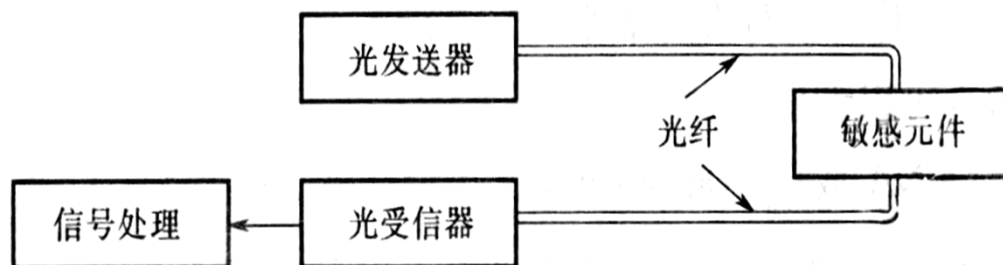
光纤传感器用光而不用电来作为敏感信息的载体；用光纤而不用导线来作为传递敏感信息的媒介,它同时具有光纤及光学测量的一些宝贵的特点。

1、光纤式传感器特点及分类

—特点



(a) 传统传感器



(b) 光纤传感器

从原理上看，以光学技术为基础，将**测量对象的状态**变成**光信号**的形式取出。

- **电绝缘**。特别适用于高压供电系统及大容量电机的测试。

- **抗电磁干扰**。适合于苛刻环境，用于各种大型机电、石油化工、矿井等强电磁干扰和易燃易爆等恶劣环境中。

- 多个相似或不同传感器可以缚在单根光纤上。还可实现分布式传感。

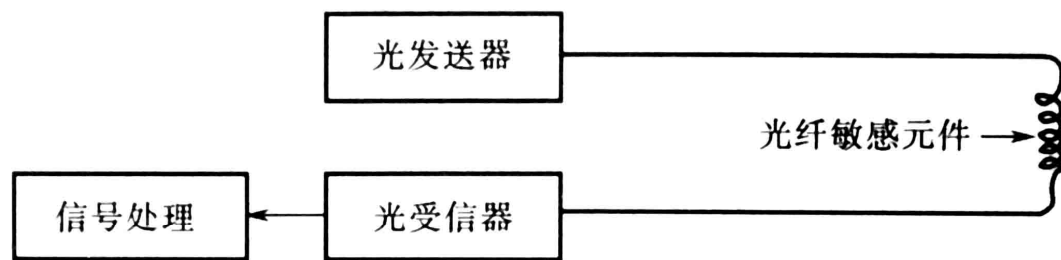
- * 成本：与普通电传感器相比，光纤传感器价格很高；

- * 耐用性：光纤传感器都十分脆弱，使用时必须加以防护；

- * 数据解释：传感器输出受到光纤系统结构的应变、温度，以及湿度等影响，造成传感器数据解释不直接。对于那些包括多个或复合传感器的系统，需要对数据进行还原和融合；

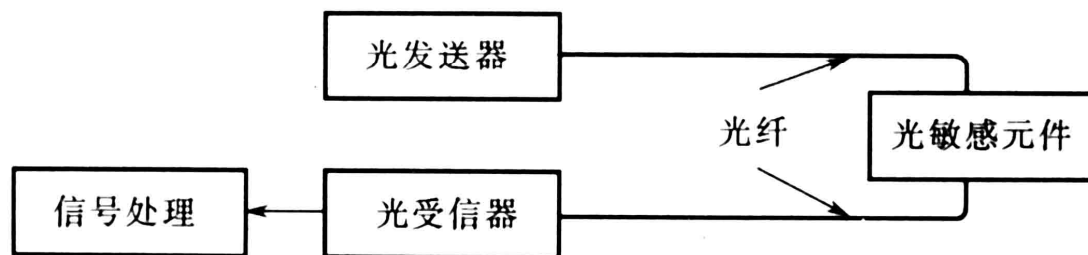
1 光纤式传感器特点及分类

—分类



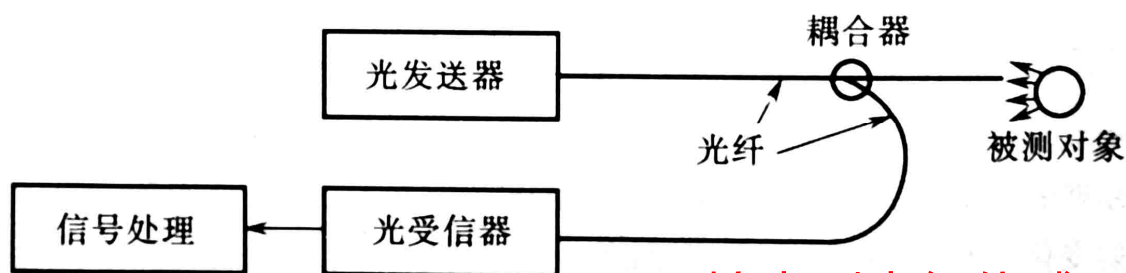
(a)

功能型光纤传感器



(b)

传光(非功能)型光纤传感器

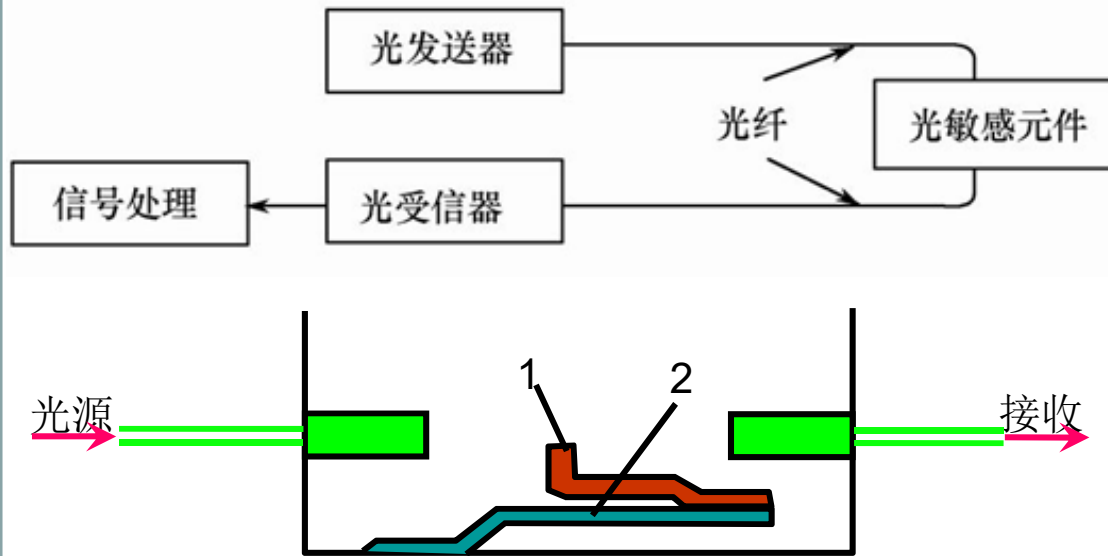


(c)

拾光型光纤传感器

根据光纤在传感器中作用分类

传光型光纤传感器



这种形式的光纤温度计能测量 $10\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的温度。检测精度约为 0.5°C 。它的缺点是输出光强受壳体振动的影响，且响应时间较长，一般需几分钟。

1) 非功能型（传光型）

光纤在其中仅起导光作用，光照在非光纤型敏感元件上受被测量调制。

优点：无需特殊光纤及其他特殊技术，比较容易实现，成本低。

缺点：灵敏度较低。

实用化的大都是非功能型的光纤传感器。

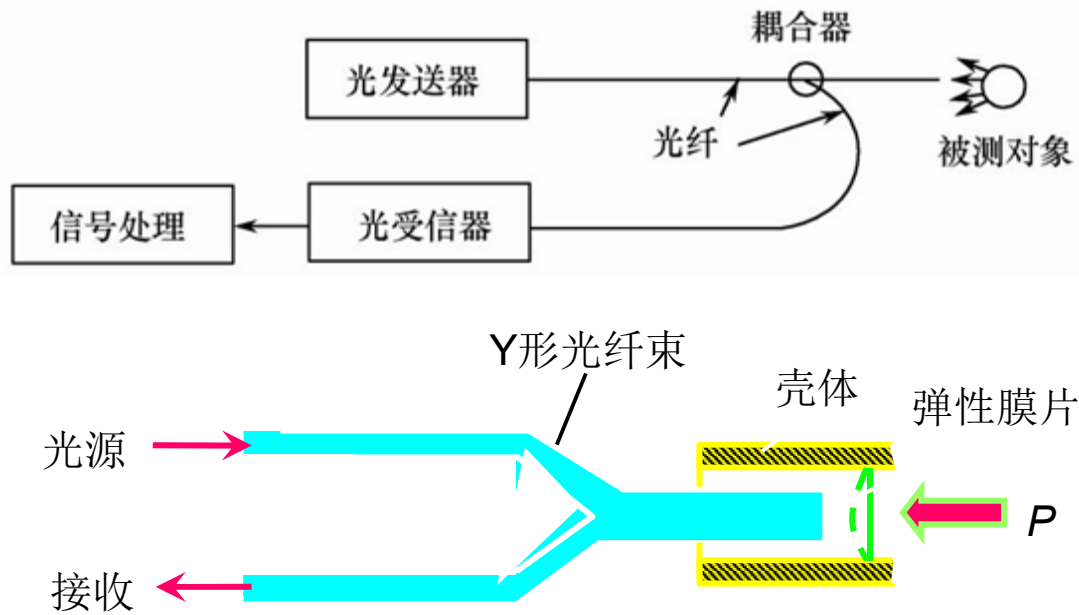
应用：遮光式光纤温度传感器的应用场合

电力系统：光纤可以放在输电线、地线的中心，不受干扰。尤其在雷击的时候能起到电设备不可替代的作用。



煤炭系统：电监控系统信号均为电信号，在含瓦斯高的矿井中容易引起爆炸。因此，如果考虑安全因素，电信号功率不能太大，这又导致传输距离受限。而如果采用光纤系统，很多设备可以无源化，即保证了安全，又能实现远距离监控。

拾光型光纤传感器



膜片反射式光纤压力传感器，在Y形光纤束前端放置一感压膜片，当膜片受压变形时，使光纤束与膜片间的距离发生变化，从而使输出光强受到调制。

2) 拾光型

用光纤作为探头，接收由被测对象辐射的光或被其反射、散射的光。

光纤纸浆流速测量，利用两个Y形光纤束传输纸浆表面的散射光，采用相关分析法测得流速。

功能型光纤传感器

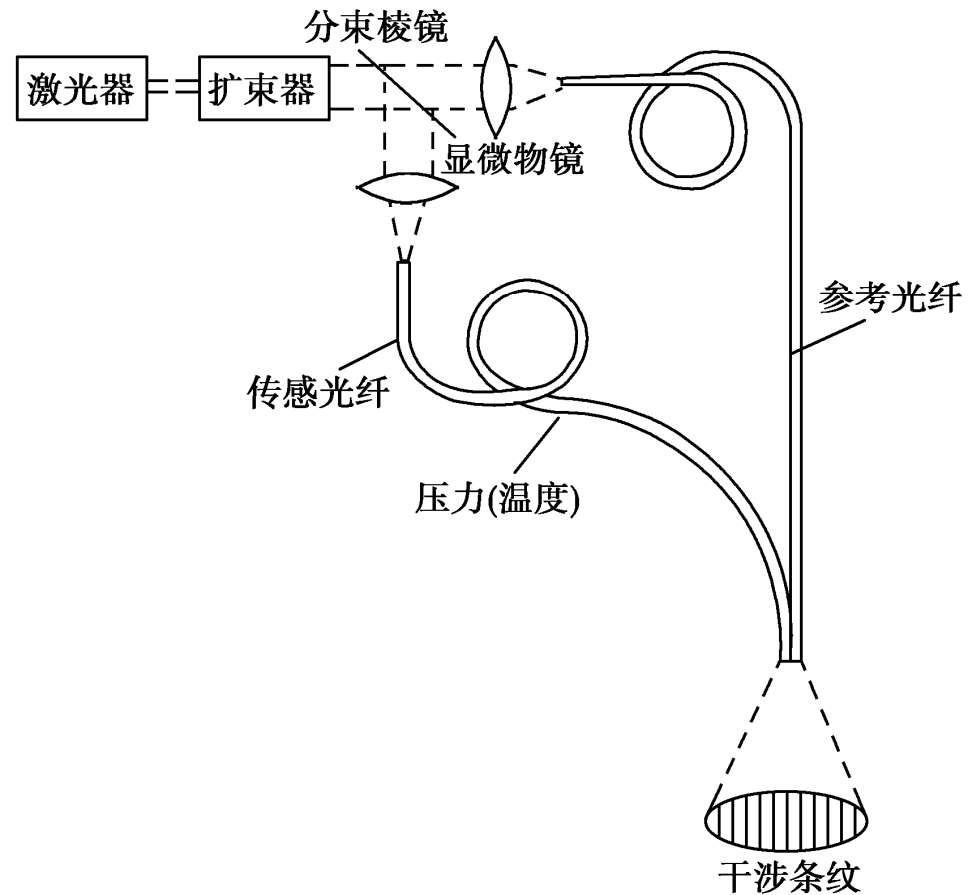


3) 功能型（全光纤型）

光纤在其中不仅是导光媒质，而且也是敏感元件，光在光纤内受被测量调制。

优点：具有传感合一的特点，结构紧凑、灵敏度高。

缺点：须用特殊光纤，成本高，

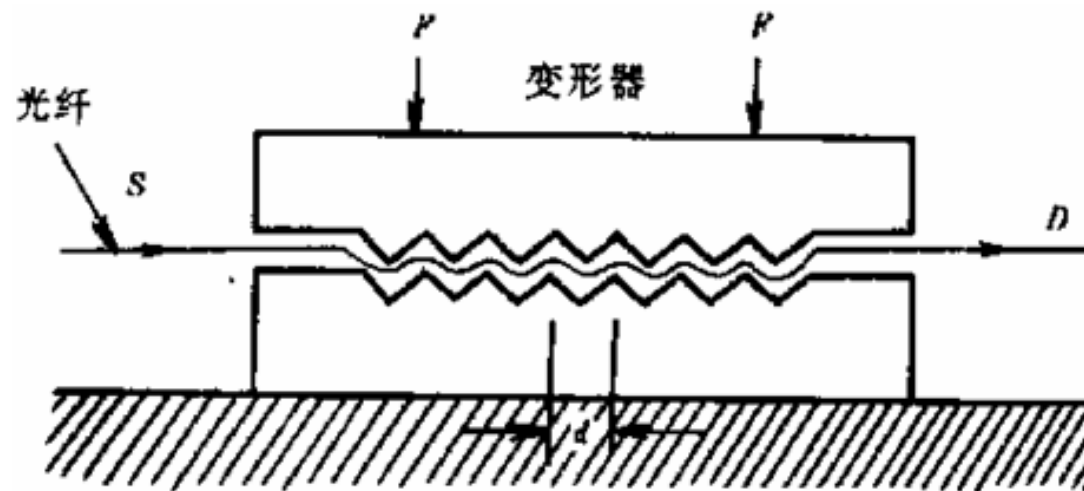


测量压力的相位调制型光纤传感器原理图

光纤传感器

利用光纤微弯产生的损耗进行光强调制

当光纤轴向受力而发生微小弯曲时，光纤中的部分光会折射到纤芯的包层中去，不产生全反射，这样将引起纤芯中的光强发生变化。因此，可测量外界作用，如应力、重量、加速度等物理量。

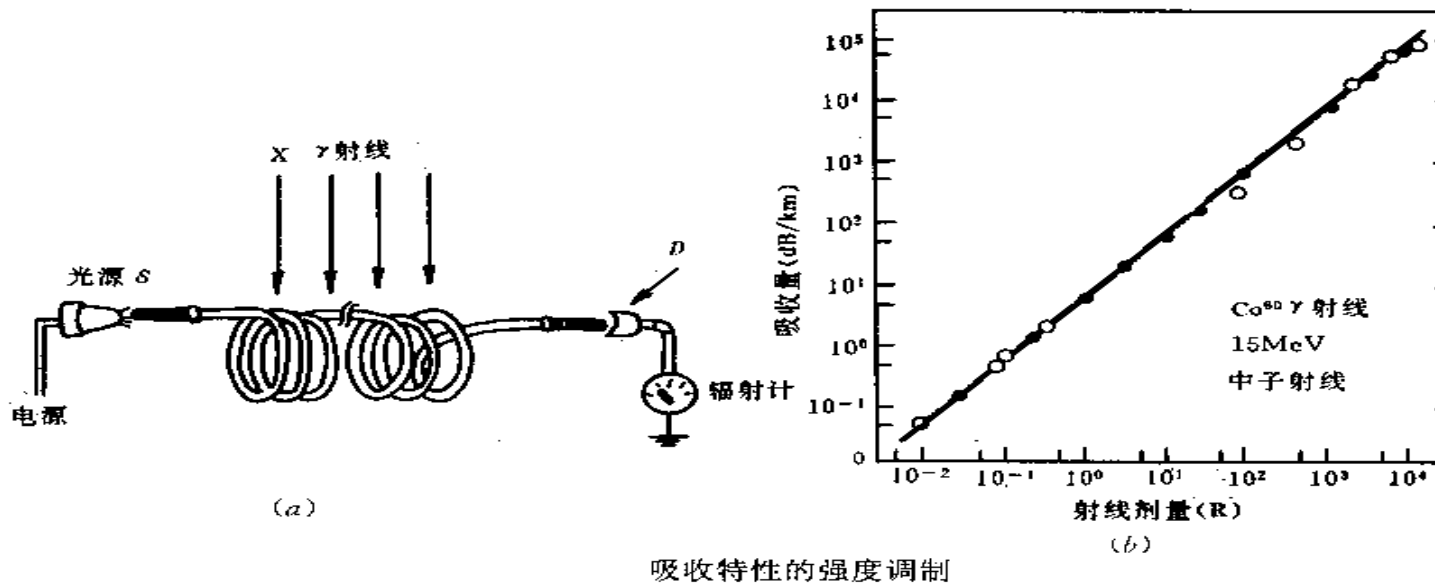


(a) 波形板式的压力传感器

光纤传感器

利用光纤的吸收特性的强度调制

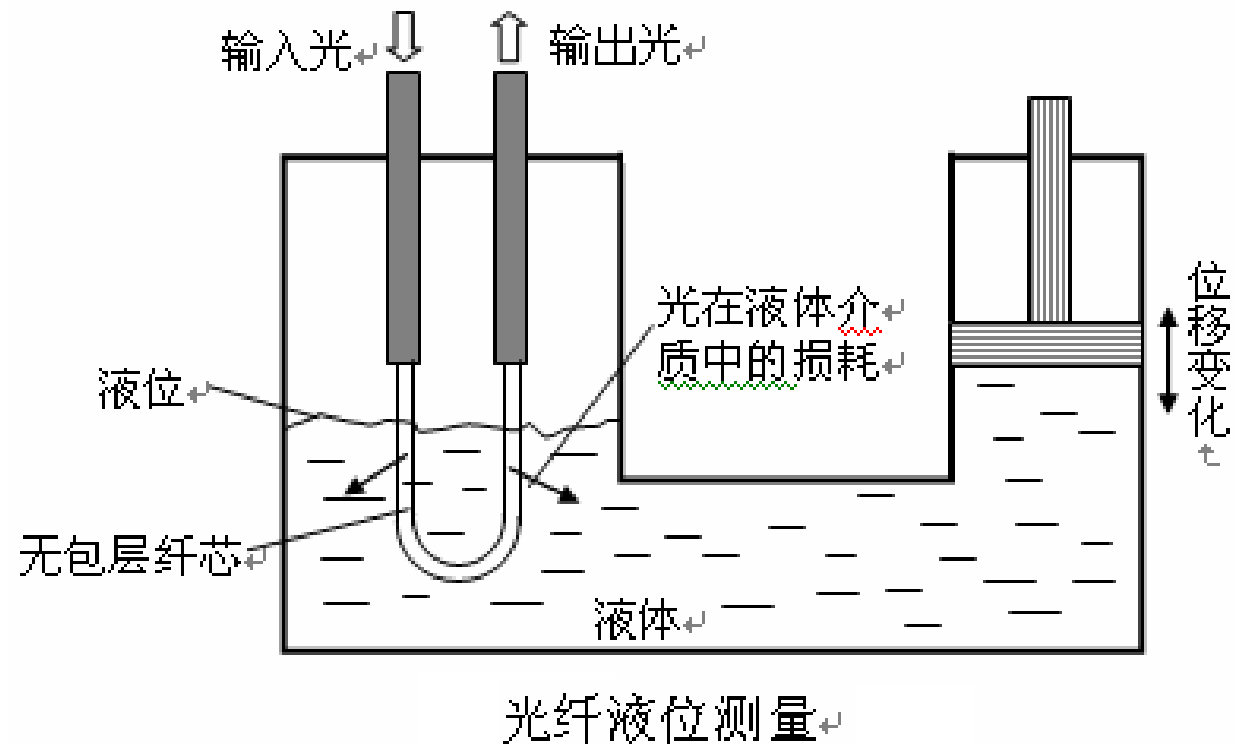
- x、 γ 射线等辐射会引起光纤材料的吸收损耗增加，使光纤的输出功率降低，从而可以构成强度调制器，用来测量各种辐射量；
- 用不同材料制成的光纤对不同射线的敏感程度是不一样的，由此还可以鉴别不同的射线。



光纤传感器

利用折射率的变化进行强度调制

光纤液位测量：



水中含油量测量等

光纤传感器

波长调制（颜色调制）

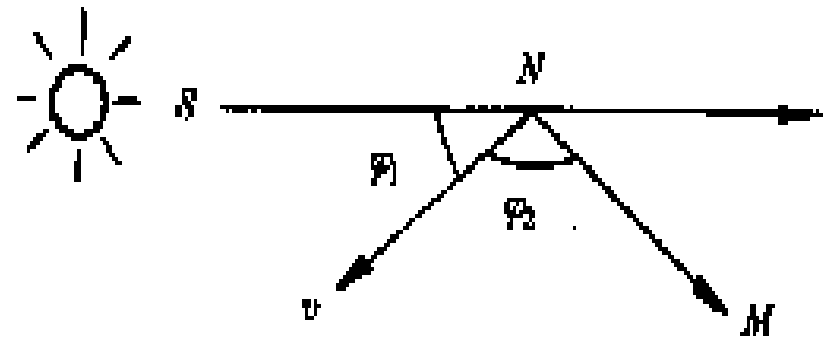
利用外界作用改变光纤中光的波长，通过检测光纤中光的波长变化来测量各种物理量的原理。

频率调制

利用外界因素改变光的频率，通过检测光的频率变化来测量外界物理量的原理。

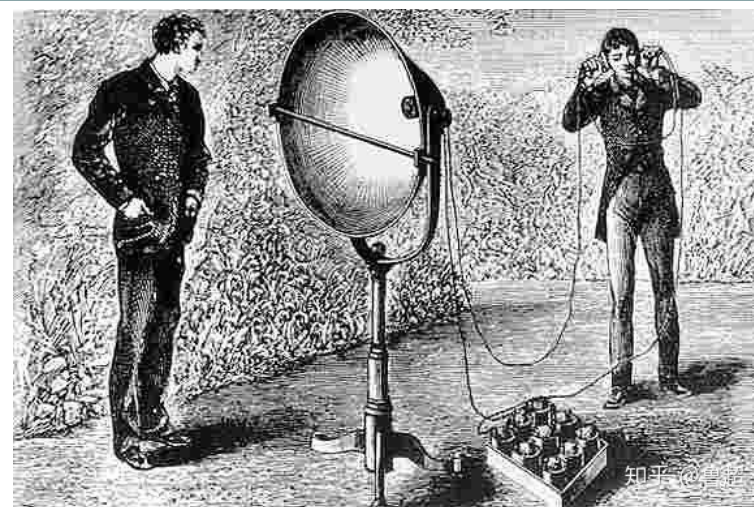
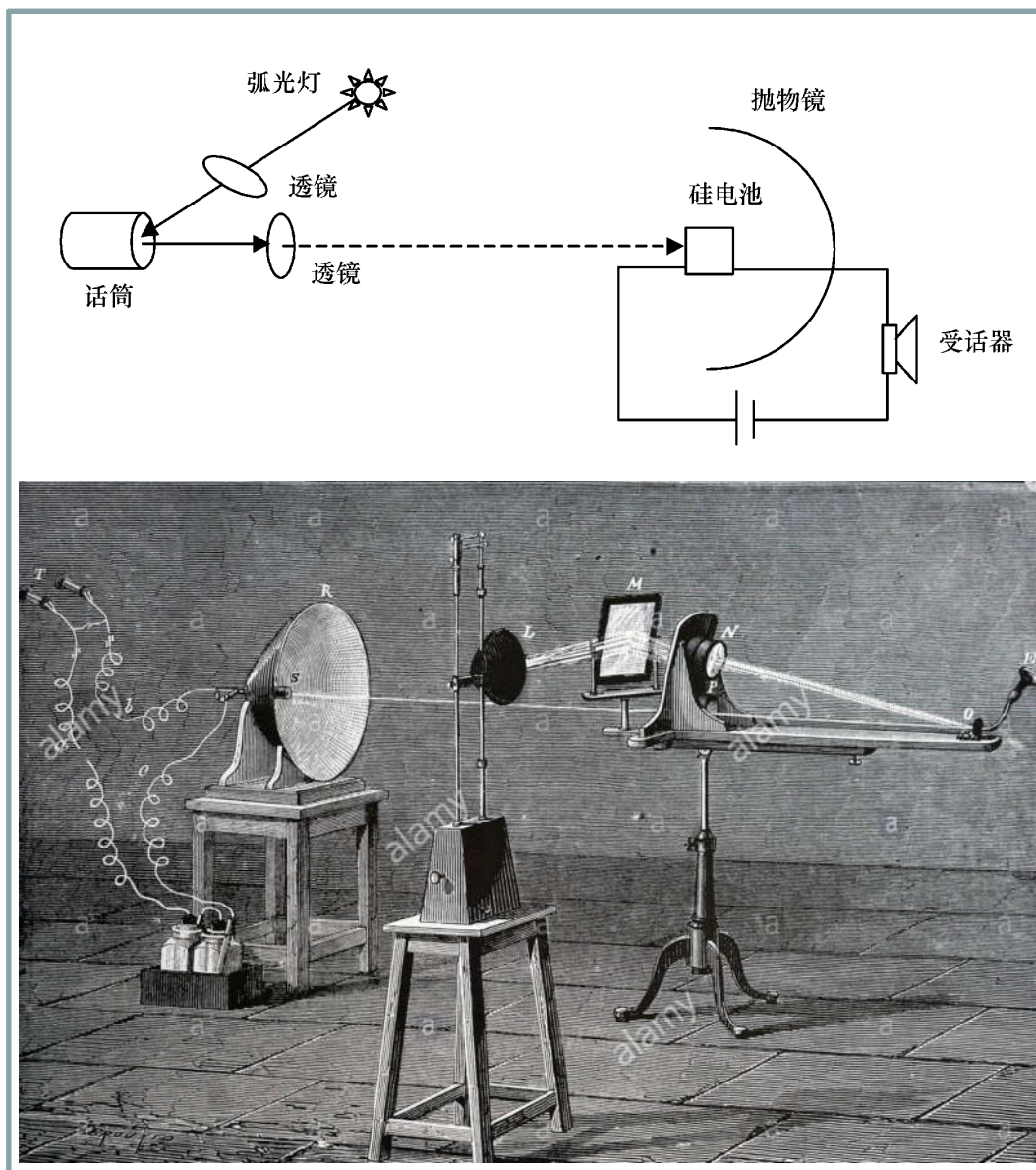
频率调制基于**光学多普勒效应**。

光学多普勒效应：当光源S发射出的光，经运动的物体散射后，观察者所见到的光波频率 f_1 相对于原频率 f_0 发生了变化。



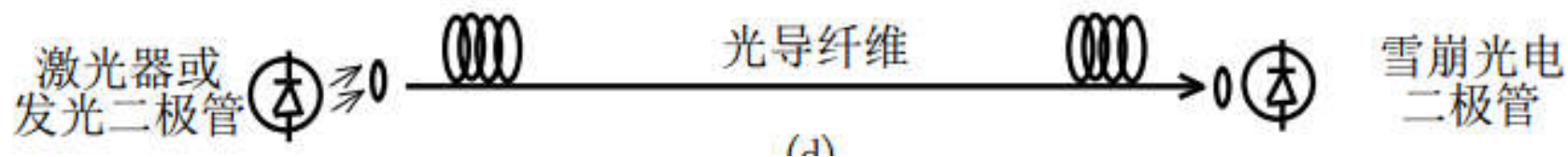
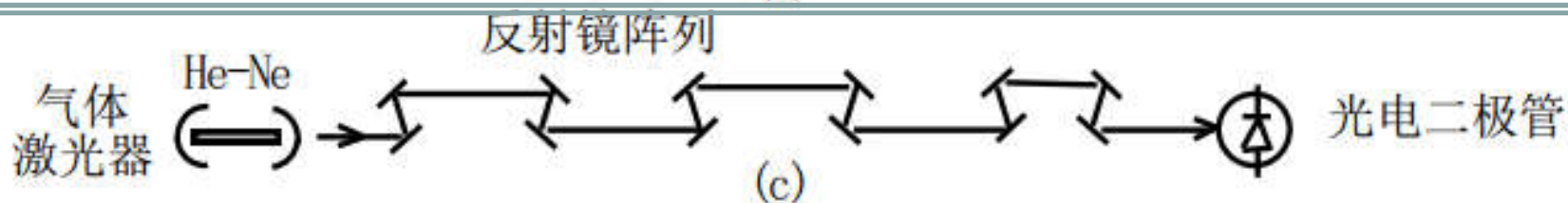
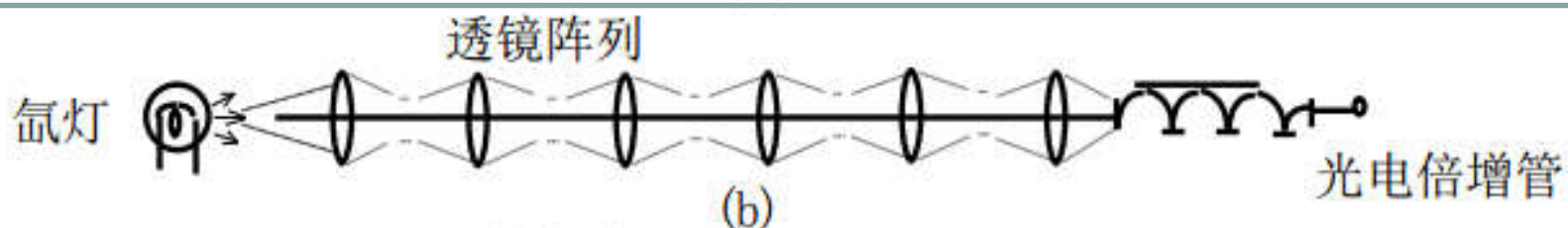
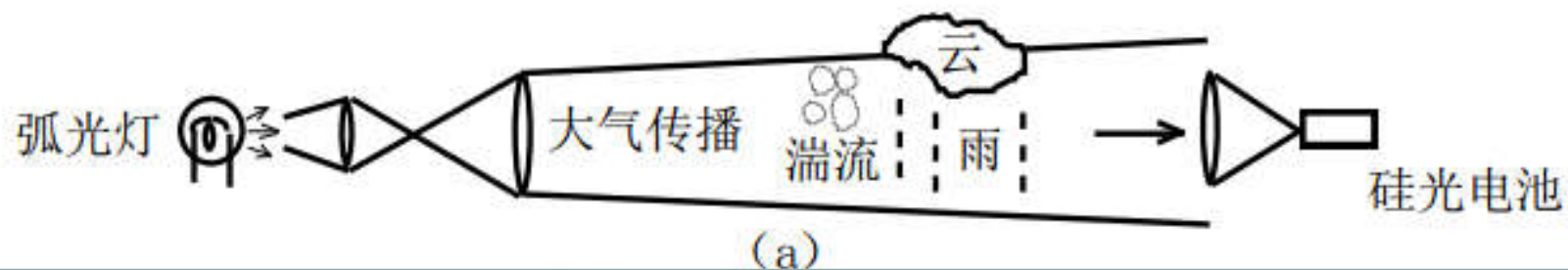
多普勒效应示意图

2、光电测量系统的主要问题

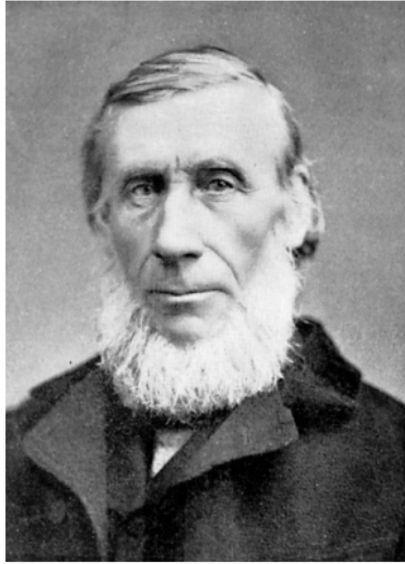


1880年贝尔发明了第一个光电话系统，恒定的弧灯光束投射在话筒的音膜上，随声音的振动而得到强弱变化的反射光束，这个过程就是调制。普通光源强度和纯度都成为制约光在空气中传输的因素，使得通话距离仅为213米。

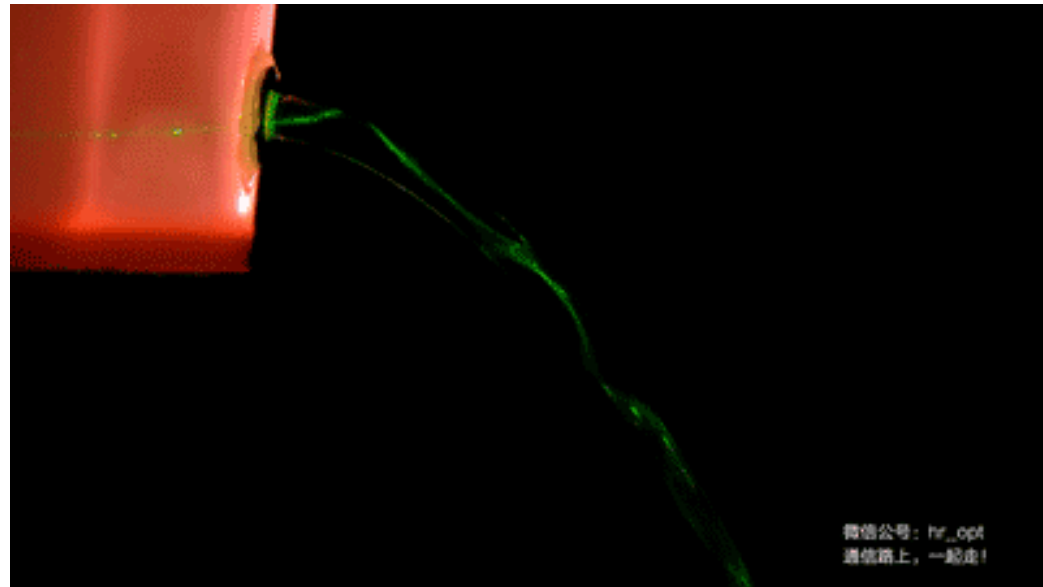
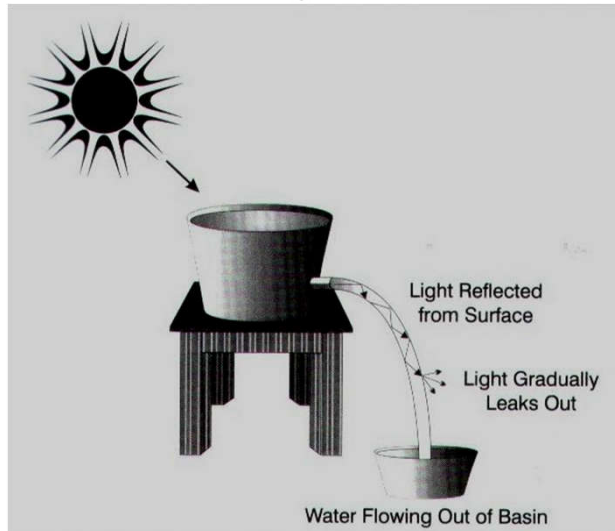
2、光电测量系统的主要问题



2、光电测量系统的主要问题:如何实现光的全反射?



Tyndall

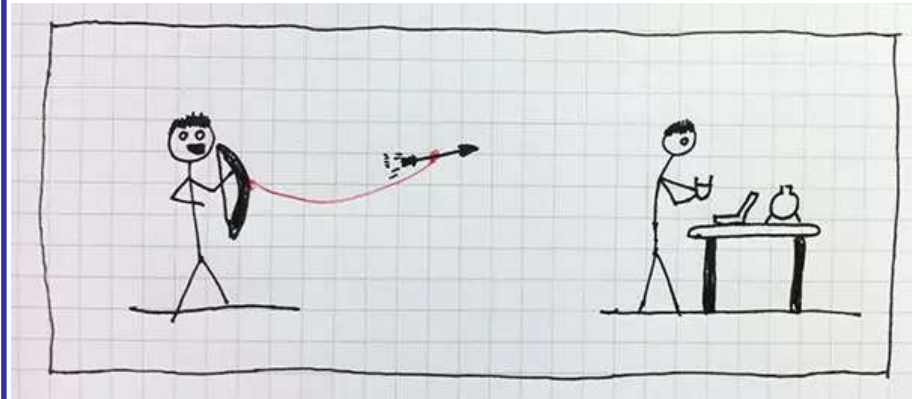
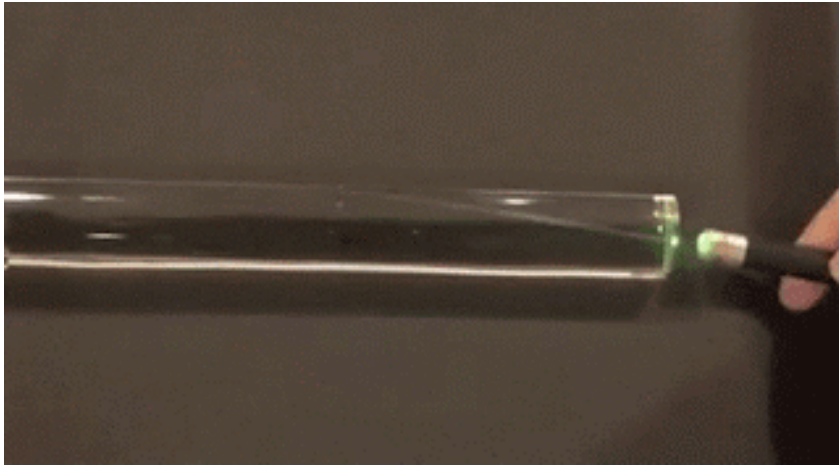


1870年,英国皇家学会的丁达尔演示了光在一束细水流中进行全内反射传输的现象。

在装满水的木桶上钻个孔,然后用灯从桶上边把水照亮。结果使观众们大吃一惊。人们看到,放光的水从水桶的小孔里流了出来,水流弯曲,光线也跟着弯曲。

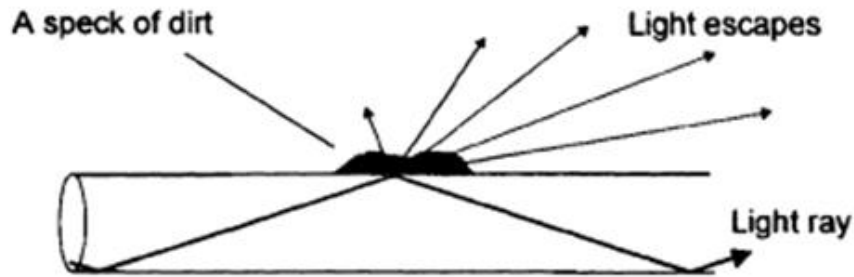
2、光电测量系统的主要问题:如何实现光的全反射?

在1841年那个水桶演示之后的近60年里，光的全内反射原理仅仅用于短距离传播领域，比如，应用于医学，牙科医生用弯曲的玻璃棒来把灯光导入病人的口腔为手术照明。



1887年，英国科学家，Charles Vernon Boys，在一根加热过的玻璃棒附近放了一张弓，当玻璃棒足够热时，把箭射出去，箭带动热玻璃在实验室里拉出了一道长长的纤细的玻璃纤维。

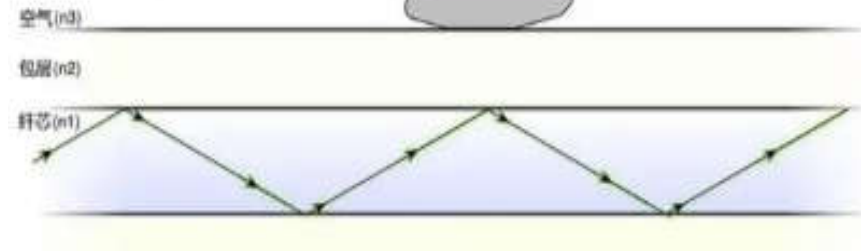
2、光电测量系统的主要问题:如何实现光的全反射?



表面污染引起能量损耗

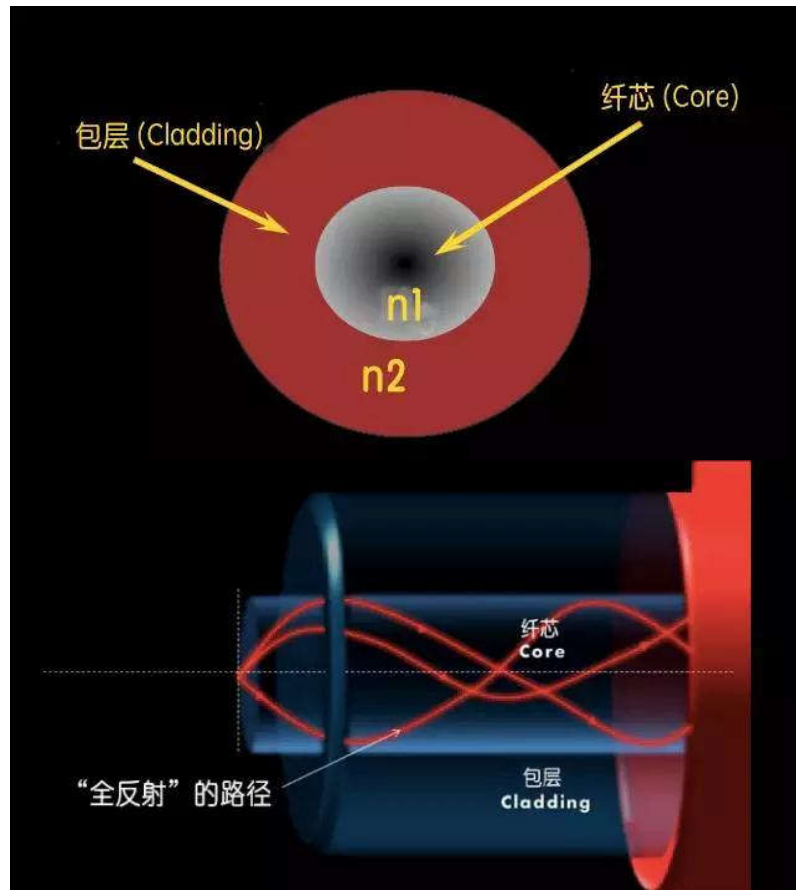
裸纤会引起光泄漏，光甚至会从粘附在光纤上的油污泄漏出去。

有包层的光纤

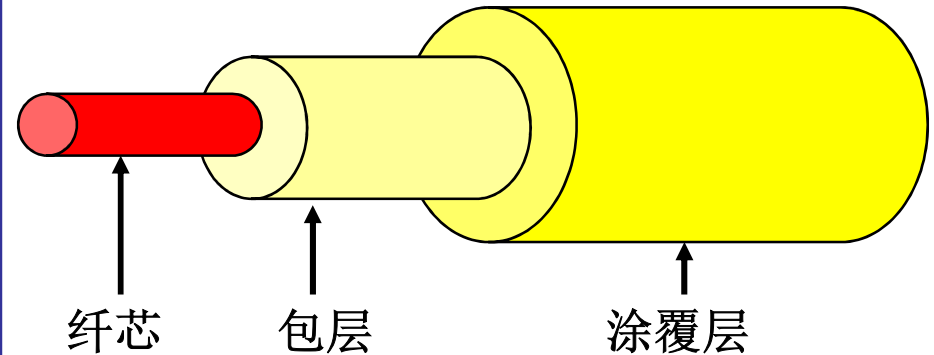


1956年，密歇根大学的本科生拉里·柯提斯制作了第一个玻璃包层光纤，他用一个折射率低的玻璃管熔化到高折射率的玻璃棒上，再把得到的棒子拉成丝。

2、光电测量系统的主要问题:如何实现光的全反射?



$n1$ = 纤芯折射率; $n2$ = 包层折射率,
 $n1 > n2$, 形成全反射条件。



一根实用化的光纤是由多层透明介质构成的，分为：

- 1) 折射率较高的纤芯、
- 2) 折射率较低的包层、
- 3) 外面的涂覆层（保护）。

1951年提出的想法

2、光电测量系统的主要问题:如何实现光的全反射?

- **斯乃尔定理(Snell's Law)**指出: 当光由光密物质(折射率大)射出至光疏物质(折射率小)时, 发生折射现象, 其折射角大于入射角, 即 $n_1 > n_2$ 时, $\theta_r > \theta_i$ 。

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$$

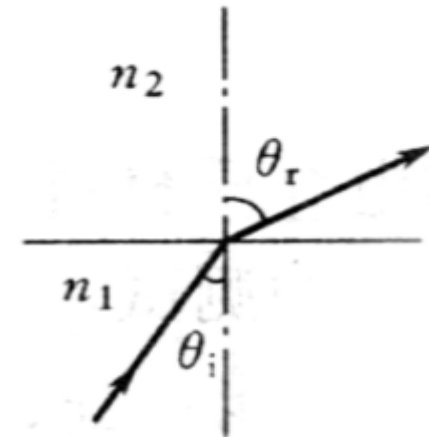
- 入射角 θ_i 增大时, 折射角 θ_r 也随之增大, 且始终 $\theta_r > \theta_i$ 。当 $\theta_r = 90^\circ$ 时, θ_i 仍小于 90° , 此时, **出射光线沿界面传播**, 称为临界状态。

$$\sin \theta_r = \sin 90^\circ = 1$$

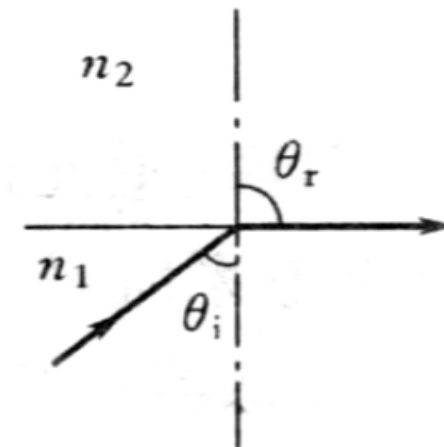
$$\sin \theta_{i_0} = n_2 / n_1$$

全反射临界角: $\theta_{i_0} = \arcsin(n_2 / n_1)$

- 当入射角增大到全反射临界角后, 出射光不再折射而是全部反射。



(a)

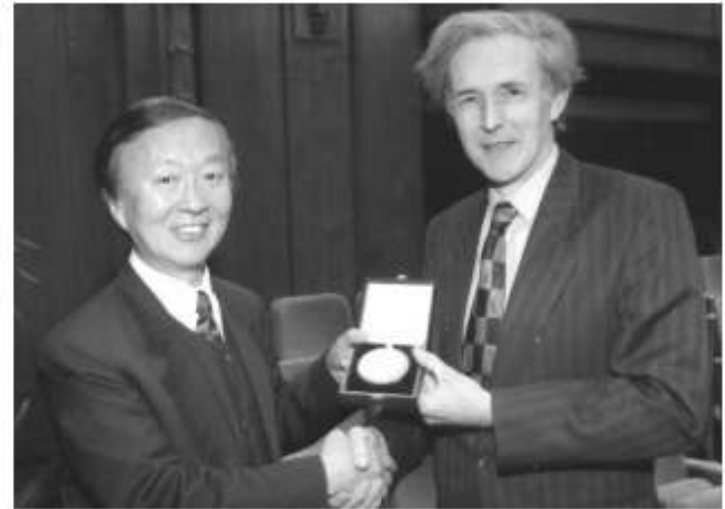


(b)

2、光电测量系统的主要问题:如何实现光的全反射?



1966年7月，在**英国标准电信研究所工作的高锟和霍克哈姆**发表《**用于光频的光纤表面波导**》。从理论上阐述了有可能把损耗降低到20dB / 公里的见解，当时相关领域的专家都认为这是天方夜谭。

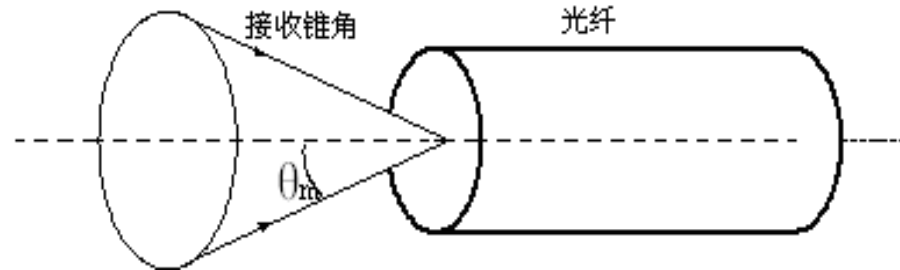


1998 年在英国接受IEEE 授予的奖章
2009年高锟获得诺贝尔物理学奖

高锟的获奖理由为——“在光学通信领域光在光纤中传输方面所取得的开创性成就”。

3 光纤式传感器：数值孔径NA- Numeric Aperture

$$NA = \sin \theta_m$$



- 数值孔径是**衡量光纤聚光能力**的参量，说明光源和光纤之间的耦合效率。
- 当入射角 θ_0 大于 θ_m 时，光线不能在光纤中传播而在包层内消失；
- 只有当入射角 θ_0 小于 θ_m 时，光线才能在光纤中传播。

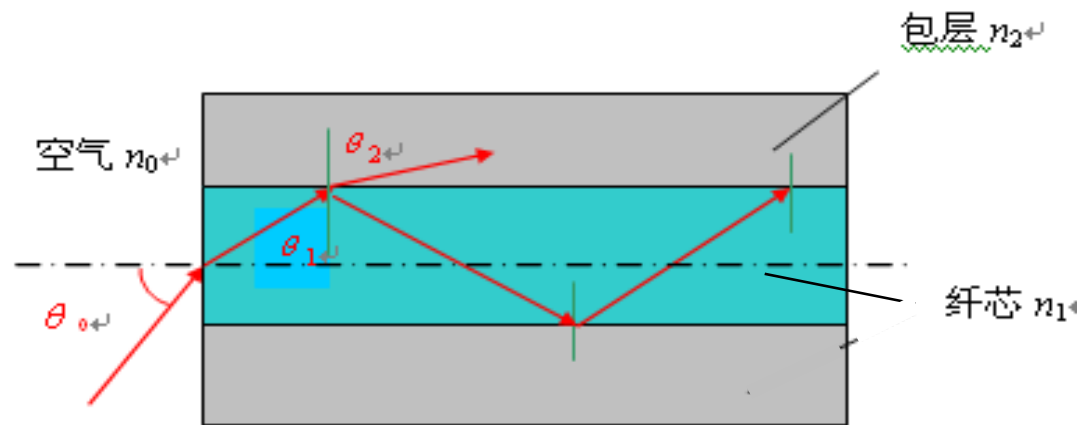


图 9-43 光线在光纤内的传播

$$\sin \beta_m = \frac{n_2}{n_1} \sin \frac{\pi}{2} = \frac{n_2}{n_1}$$

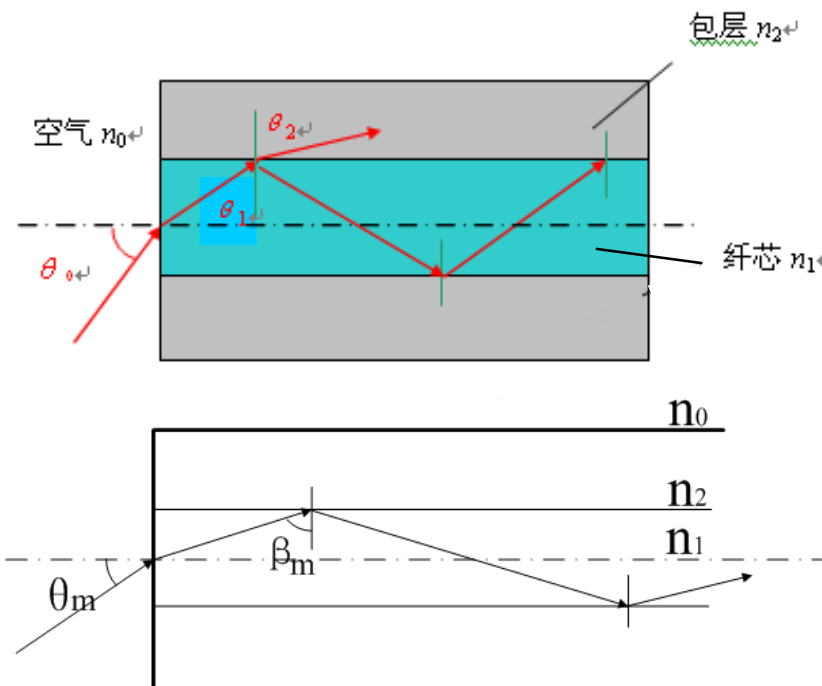
而光是由折射率为 n_0 的空气中入射的，根据折射定律可得：

$$\frac{\sin \theta_m}{\sin(\frac{\pi}{2} - \beta_m)} = \frac{n_1}{n_0}$$

令 $n_0=1$ ，则

$$\begin{aligned} \sin \theta_m &= n_1 \sin(\frac{\pi}{2} - \beta_m) = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \beta_m} \\ &= n_1 \sqrt{1 - (\frac{n_2}{n_1})^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} = NA \quad (n_1 \approx n_2) \end{aligned}$$

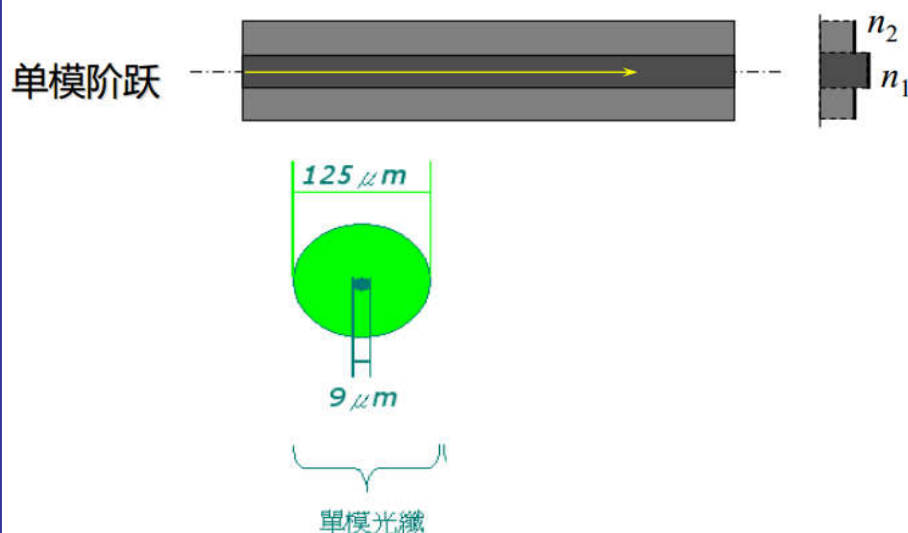
其中 $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ ，称为光纤的相对折射率差。



阶跃光纤的数值孔径

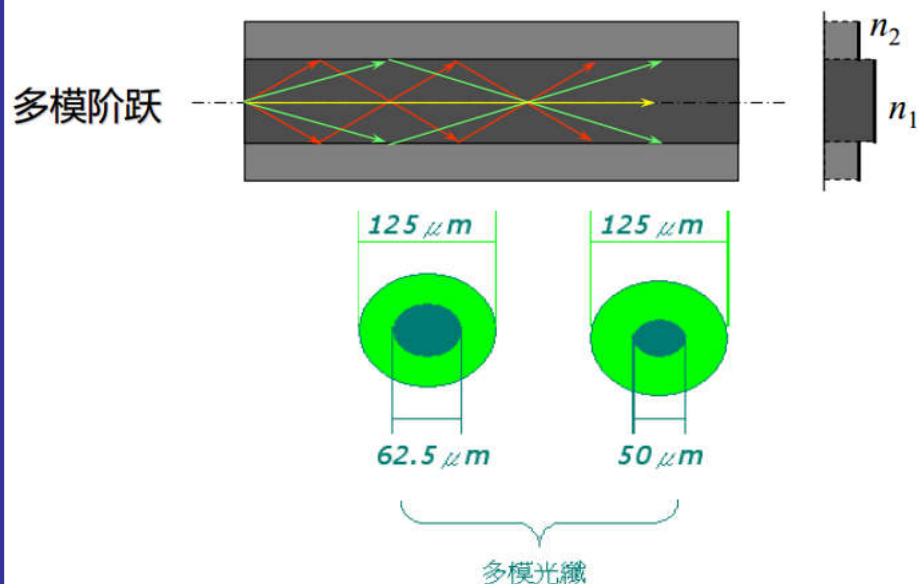
3 光纤式传感器：多模与单模光纤

单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)



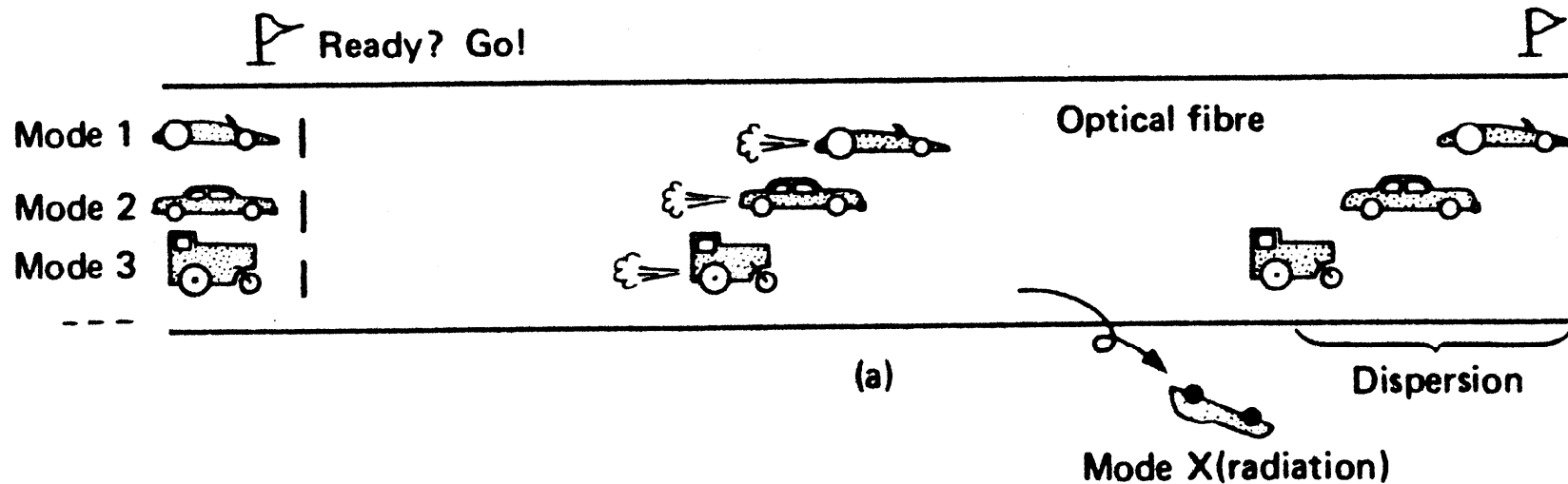
• 单模光纤当光纤的几何尺寸(主要是芯径)较小, 与光波长在同一数量级, 如芯径在5~10微米范围, 这时, **光纤只允许一种模式(基模)在其中传播**, 其余的高次模全部截止, 这样的光纤称为单模光纤。

多模光纤(Multi-Mode Fiber, MMF)



• 当光纤的几何尺寸 (主要是芯径) 远大于光波波长时 (约1微米), 光纤传输的过程中会存在着几十种乃至几百种传播模式。这样的光纤称为多模光纤。

3 光纤式传感器：多模光纤



- **多模光纤：**顾名思义，多模光纤就是允许多个模式在其中传输的光纤，或者说在多模光纤中允许存在多个分离的传导模。
- **优点：**芯径大，容易注入光功率，可以使用LED作为光源
- **缺点：**存在模间色散，只能用于短距离传输
- **模间色散：**每个模式在光纤中传播速度不同，导致光脉冲在不同模式下的能量到达目的的时间不同，造成脉冲展宽

3 光纤式传感器：多模光纤

光纤的色散



- 脉冲展宽的主要原因是色散；光的色散是由于光在物质中的速度以及物质的折射率与光的波长有关而发生的现象；
- 光纤中的色散根据其产生原因有：模式色散、材料色散和波导色散。
- 在多模光导纤维中，模式色散则是主要的影响因素。

单模光纤不存在模式色散，单模传输的模式单纯，能层集中，失真小，光脉冲频率高，通信容量大；但是由于它的芯径太细，制造工艺要求高，所以目前大量应用的仍多采用芯径较大的多模光导纤维。

本章内容

重点：

- 1. 光纤式传感器的几种类型。**
- 2. 光纤式传感器的实例。**
- 3. 光纤全反射条件和数值孔径。**
- 4. 多模和单模光纤的定义。**

END !