

-自动化学院学科核心课-

检测技术与自动化

第3章 传感器原理与应用-1-光纤传感器



山体滑坡监测问题





1 光纤传感器

1.1 光导纤维的结构和导光原理

1.2 光导纤维的主要参数

1.3 光纤传感器工作原理

1.4 光纤传感器的分类

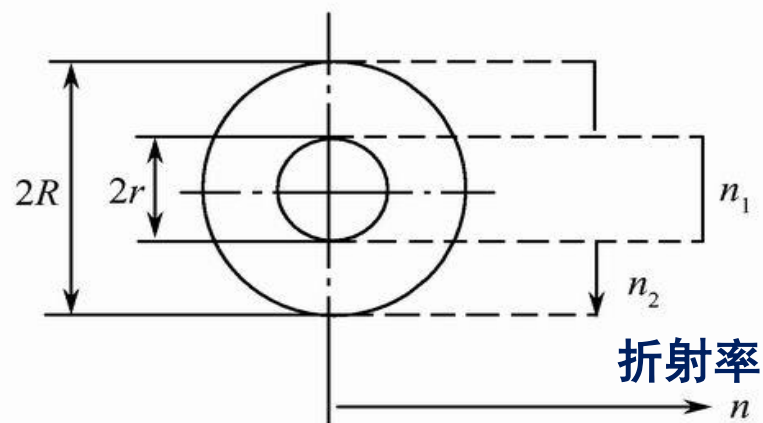
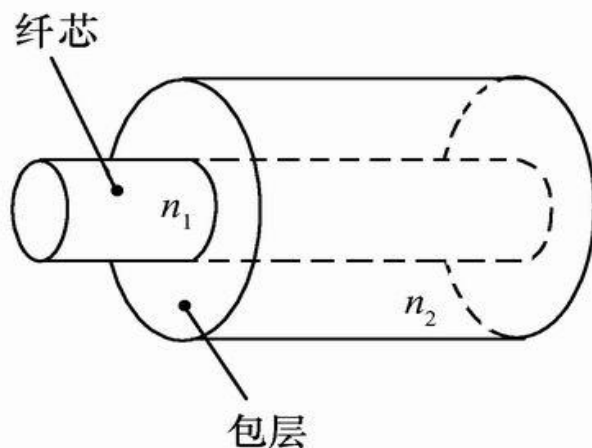
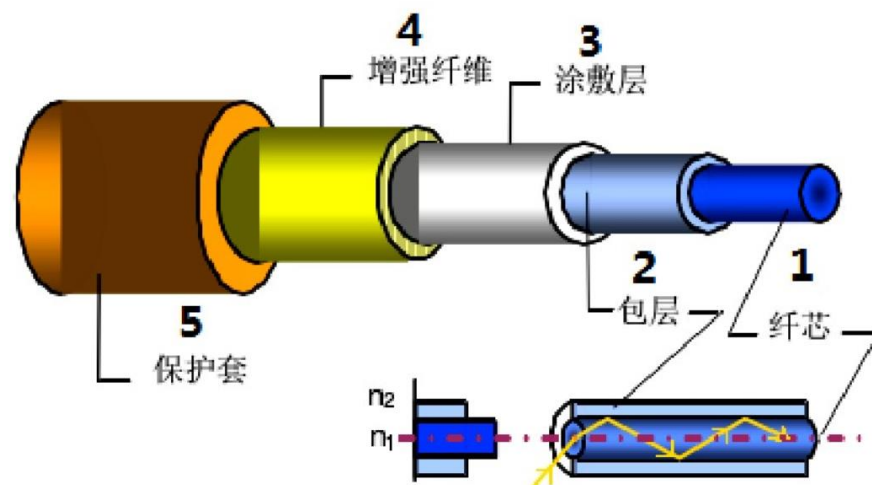
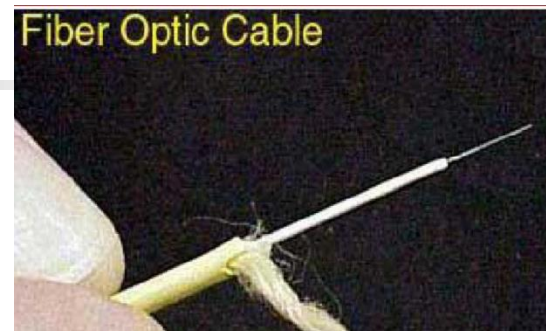
1.5 光纤传感器的特点

1.6 光纤传感器的应用

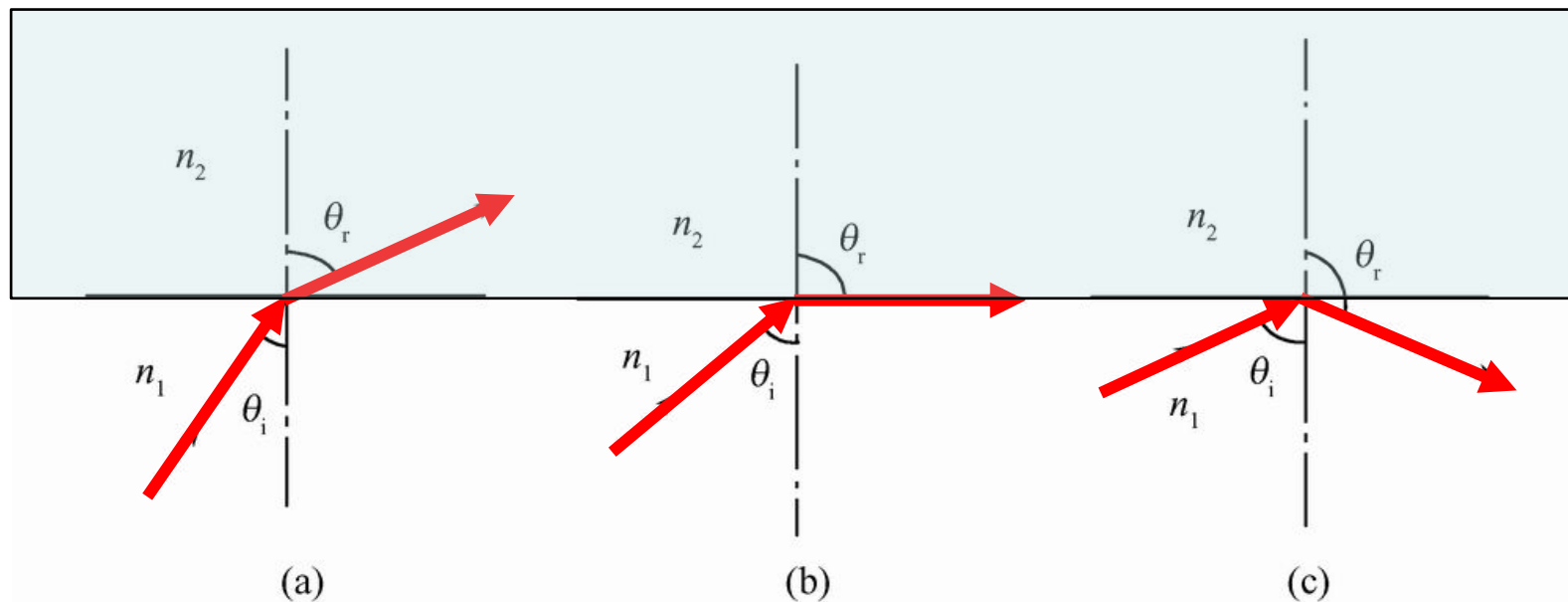
1.1 光导纤维的结构和导光原理

由圆柱形纤芯和包层组成，而且纤芯的折射率略大于包层的折射率。纤芯直径为几微米至几百微米，材料主体为二氧化硅。

围绕纤芯的是较小折射率的玻璃包层。



当波穿过两个各向同性介质的分界面时，波的传播方向改变。



(a) 折射角大于入射角: $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$

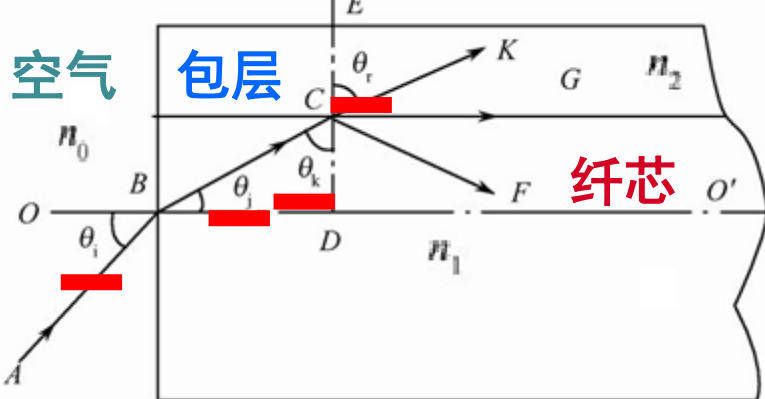
(b) 临界状态: $\theta_{i_0} = \arcsin(n_2 / n_1)$

(c) 全反射: $\theta_i > \theta_{i_0}$

光纤从光密物质（大折射率）射向光疏物质（小折射率），满足一定条件时，光纤产生全发射，反射光不再离开光密物质。



$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_j \quad n_1 \sin \theta_k = n_2 \sin \theta_r$$



$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_j$$

$$\theta_j = 90^\circ - \theta_k$$

$$\sin \theta_i = (n_1 / n_0) \sin \theta_j$$

$$\sin \theta_i = (n_1 / n_0) \sin(90^\circ - \theta_k) = \frac{n_1}{n_0} \cos \theta_k = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_k}$$

$$\begin{aligned}\sin \theta_i &= \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \sin \theta_r\right)^2} \\ &= \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \sin^2 \theta_r}\end{aligned}$$

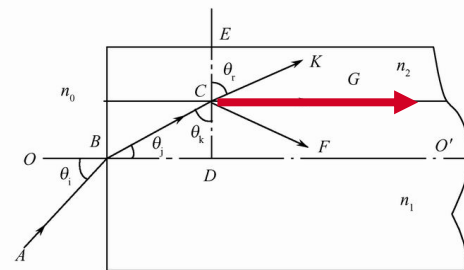
$$\sin \theta_k = (n_2 / n_1) \sin \theta_r$$

n_0 为入射光线 AB 所在空间的折射率，一般为空气，故 $n_0 \approx 1$

$$\sin \theta_i = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \sin^2 \theta_r}$$

当 $\theta_r = 90^\circ$ 的临界状态时,

$$\sin \theta_{i_0} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

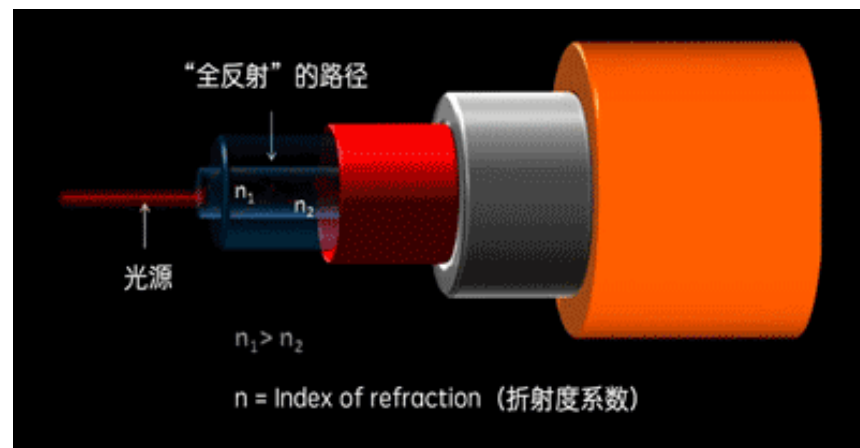


$\sin \theta_{i_0}$ 定义为“数值孔径” NA (Numerical Aperture), 无量纲, 用以衡量该系统能够收集的光的角度范围, 描述光进出光纤时的锥角大小。

$$\sin \theta_{i_0} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$$

相对折射率差

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$$



$\arcsin NA$ 是一个临界角

$\theta_i > \arcsin NA$, 光线进入光纤后不能传播在包层消失

$\theta_i < \arcsin NA$, 光线才可以进入光纤被全反射传播

1.2 光导纤维的主要参数

1) 数值孔径 (NA)

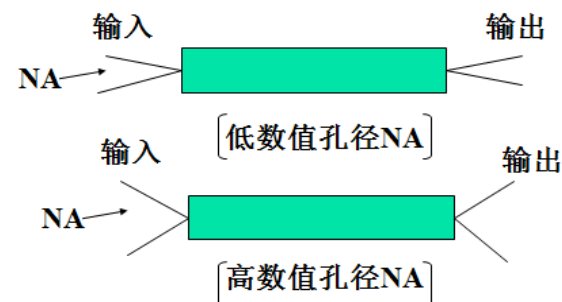
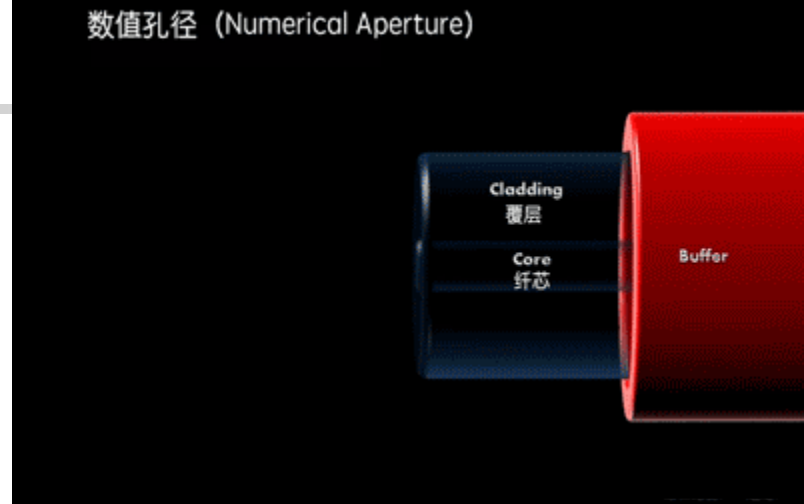
$$NA = \sin \theta_{i0} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

反映纤芯接收光量的多少，标志光纤接收性能。

大的数值孔径，有利于耦合效率的提高。

但数值孔径太大，光信号畸变也越严重。

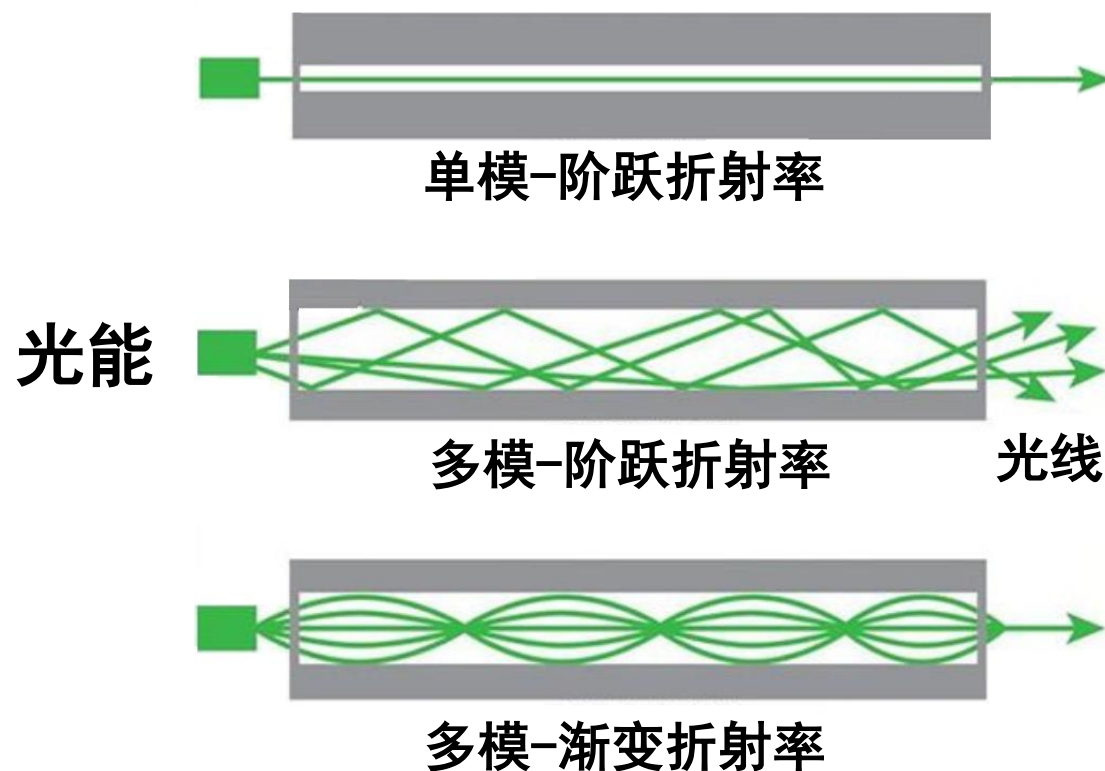
意义：无论光源发射功率有多大，只有 $2\theta_{i0}$ 张角之内的光功率能被光纤接受传播。



2) 光纤模式

光波沿光导纤维传播的途径和方式。

在光导纤维中传播模式很多对信息的传输是不利的，导致合成信号的畸变，因此我们希望模式数量越少越好。





光导纤维传输中的一个重要性能就是模式分布。

光纤的归一化频率是为表征光纤中所能传输的模式多少而引入的一个特征参数。

其定义为：

$$v = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi r}{\lambda} NA = k_0 r n_1 \sqrt{2\Delta}$$

式中： r —光纤的纤芯半径

λ —光纤的工作波长

n_1 —光纤纤芯折射率

n_2 —光纤包层折射率

k_0 —真空中的波数

Δ —光纤的相对折射率差



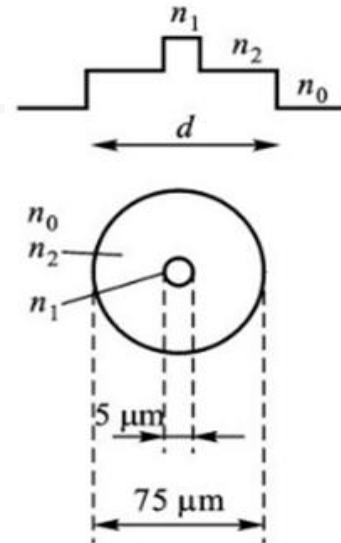
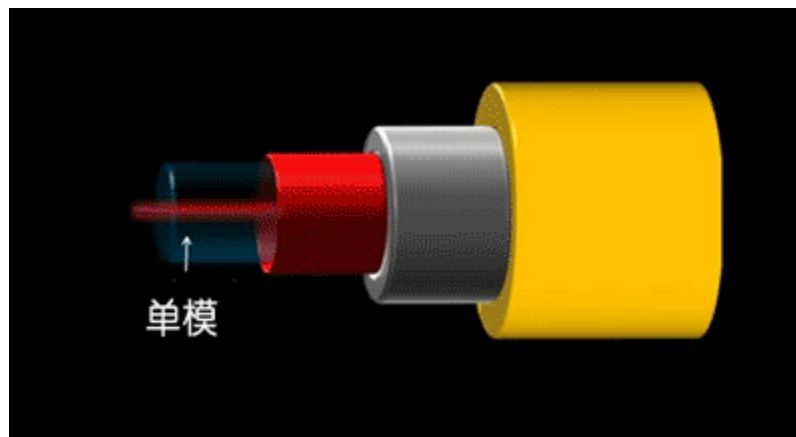
2) 光纤模式

模式讨论:

1) 模式值越大, 允许传播的模式值越多。在信息传播中, 希望模式数越少越好, 若同一光信号采用多种模式会使光信号分不同时间到达多个信号, 导致合成信号畸变。

2) 模式值 v 小, 当 $v < 2.405$ 时 (即纤芯直径 r 小), 光纤中只允许一个模式传播, 称单模光纤, 其性能最好, 畸变小、容量大、线性好、灵敏度高, 但制造、连接困难。

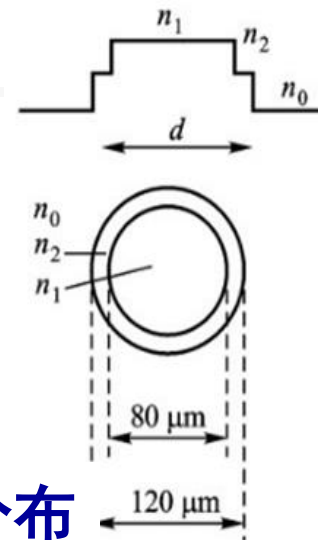
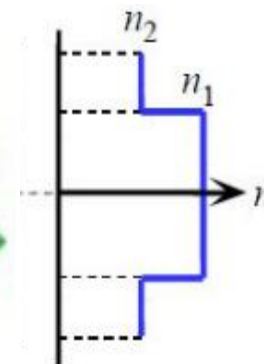
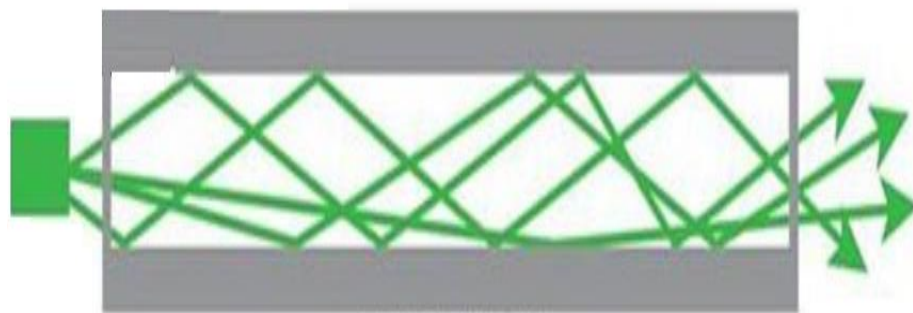
- 单模光纤:



单孔型光纤的纤芯直径较小（数微米）接近于被传输光波的波长，光在纤芯中传导，能量损失很小，适于远距离传输。

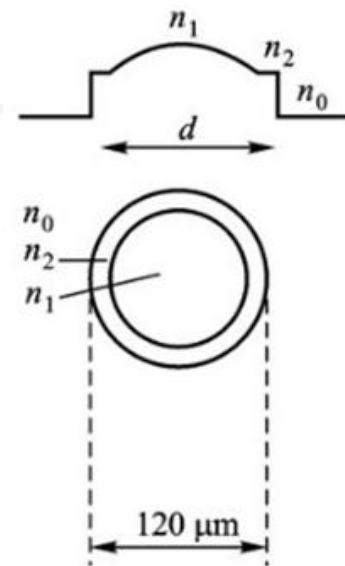
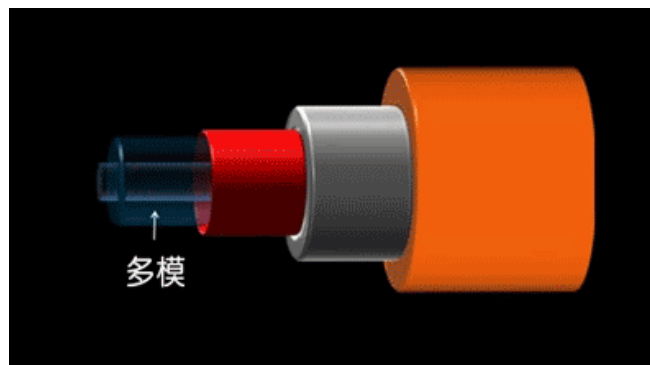
- 阶跃型多模光纤:

多模阶跃折射率光纤 折射率分布

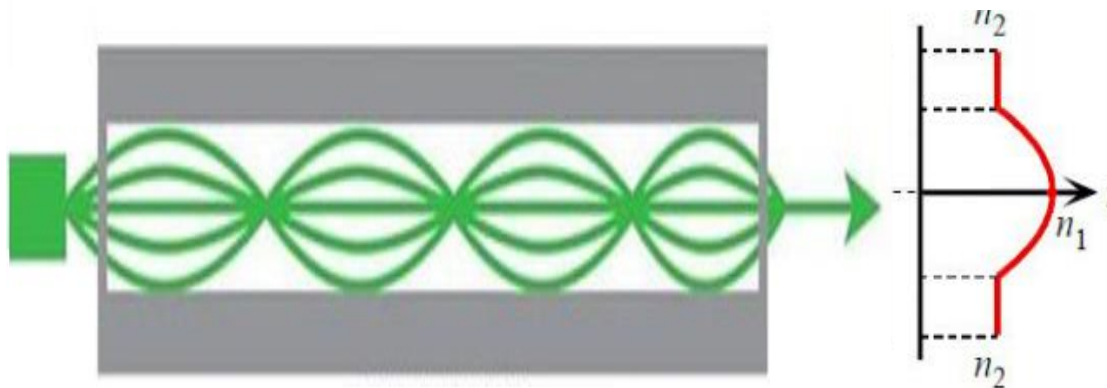


阶跃型：光纤纤芯的折射率分布各点均匀一致

- 梯度型多模光纤：



多模渐变折射率光纤 折射率分布



梯度型光纤的折射率成聚焦型，即在轴线上折射率最大，离开轴线则逐步降低，至纤芯区的边沿时，降低到与包层区一样。



3) 传播损耗

损耗原因：光纤纤芯材料的吸收、散射，光纤弯曲处的辐射损耗等的影响

$$A = al = 10 \lg \frac{I_0}{I} \quad \text{传播损耗（单位为dB）}$$

式中： l ——光纤长度

a ——单位长度的衰减

I_0 ——光导纤维输入端光强

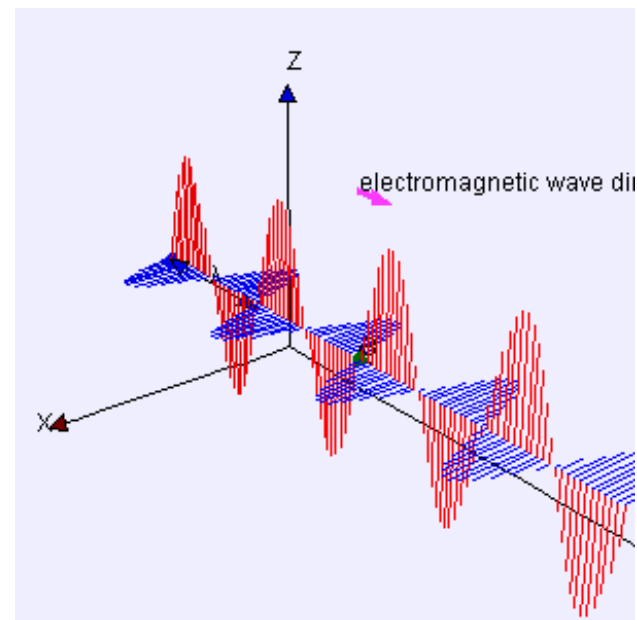
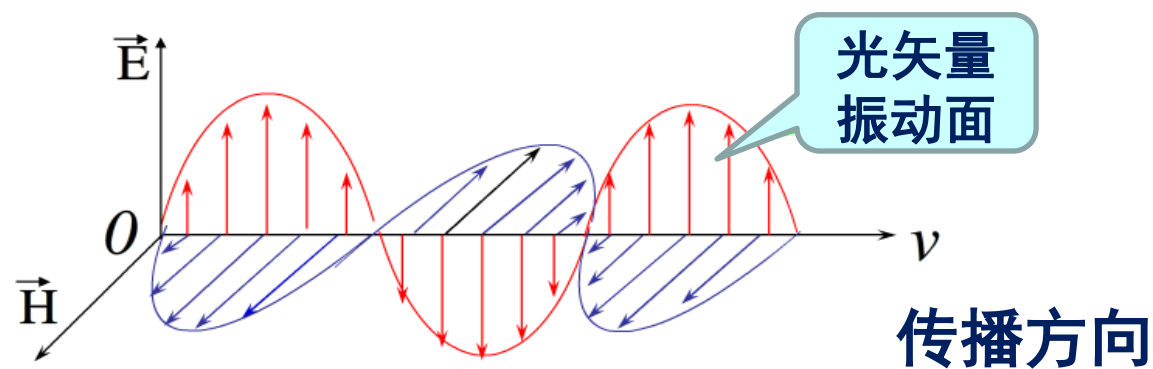
I ——光导纤维输出端光强





1.3 光纤传感器工作原理

光是一种电磁波：电矢量，磁矢量，电矢量 \vec{E} 与磁矢量 \vec{H} 相互垂直，它们分别又与电磁波的传播方向垂直。光波中可引起人视觉的是电矢量，故偏振以电矢量 \vec{E} 为准。



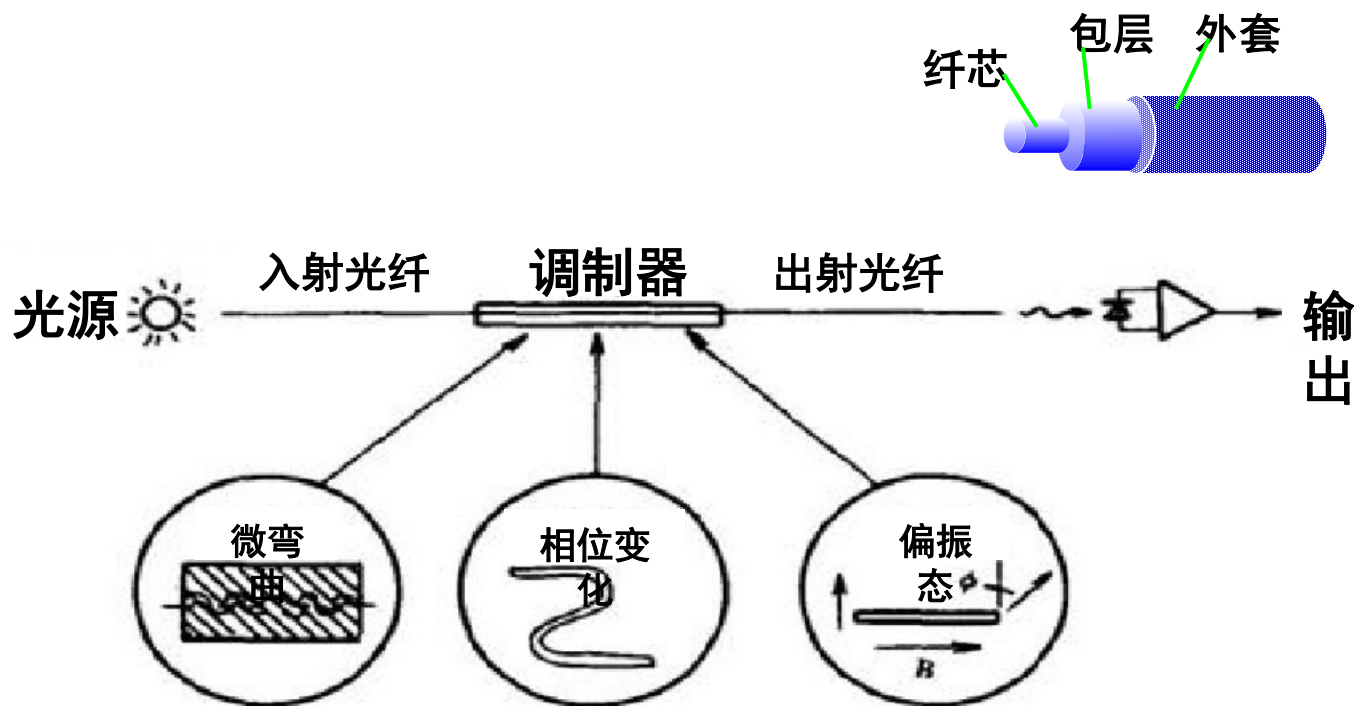
光的电矢量 $\vec{E} = \vec{B} \sin(\omega t + \phi)$

被测量调制：

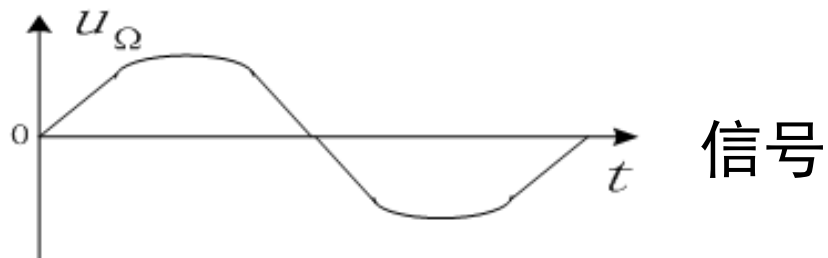
光的强度、偏振态（矢量 B 方向）、频率、波长和相位

光解调

光纤传感器的基本原理：光导纤维不仅可以作为光波的传播介质，而且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、波长等**）因外界因素（如**温度、压力、磁场、电场、位移、应变等**）的**作用而间接或直接地发生变化**，从而可将光纤用作传感元件来探测各种物理量。



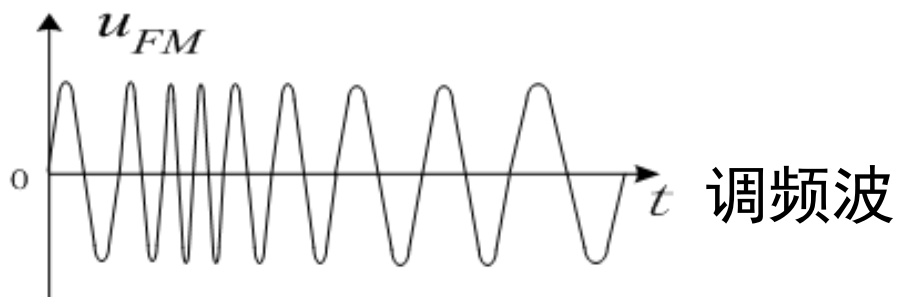
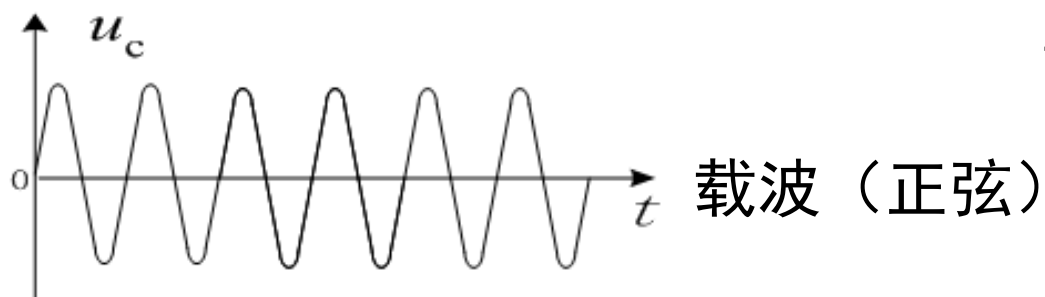
概念解释1：调制和解调



调制：

调制过程就是将一携带信息的信号叠加到载波上

调制
—
调频



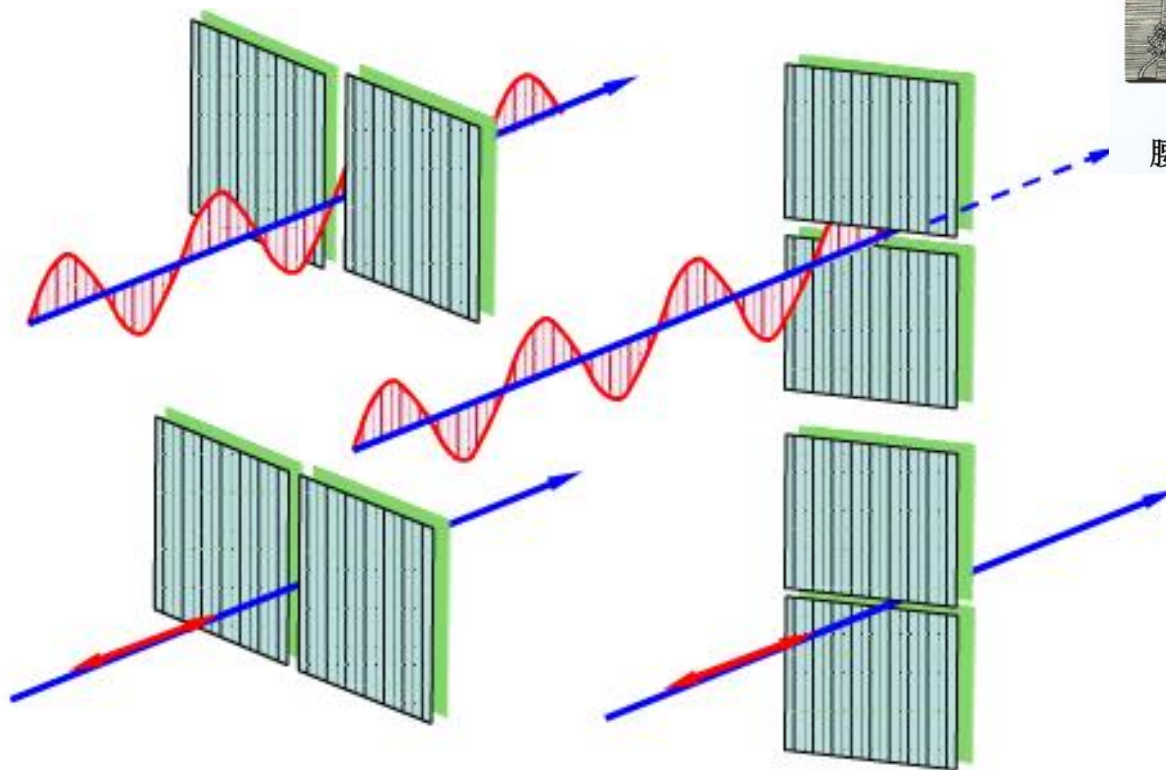
解调：

从调频波中提取原始信号

概念解释2：横波与纵波，偏振

光是横波；横波有偏振现象，纵波无偏振现象。

横波和纵波分别穿过狭缝

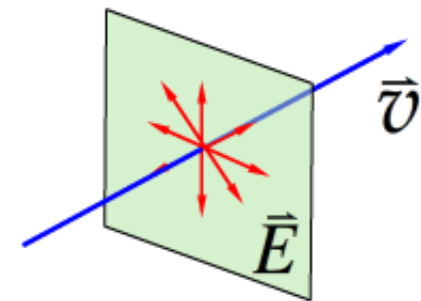


腰横扁担进不了城门

概念解释2：横波与纵波，偏振

自然光：

由太阳、电灯等光源直接发出的光，发射的光振动，出现在各个方向的几率相等。

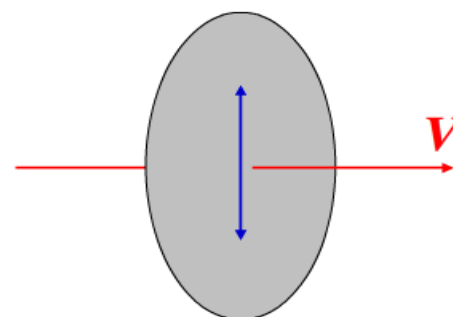
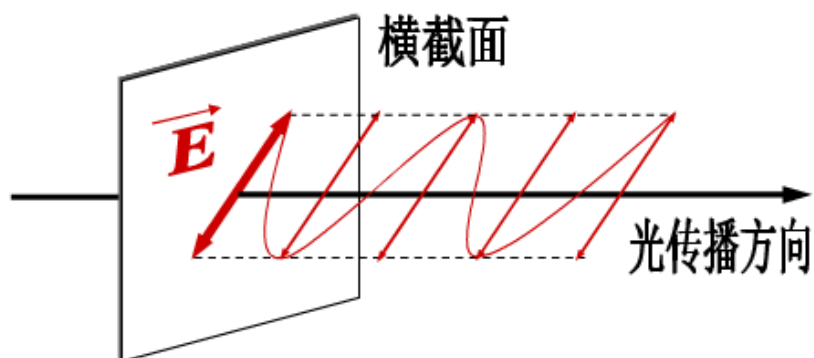


符号表示

概念解释2：横波与纵波，偏振

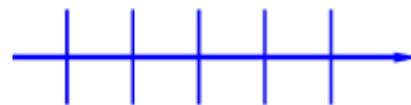
通常看到的绝大部分光都是偏振光

偏振光（平面偏振光、线偏振光、完全偏振光）：
光振动只沿某一固定方向的光

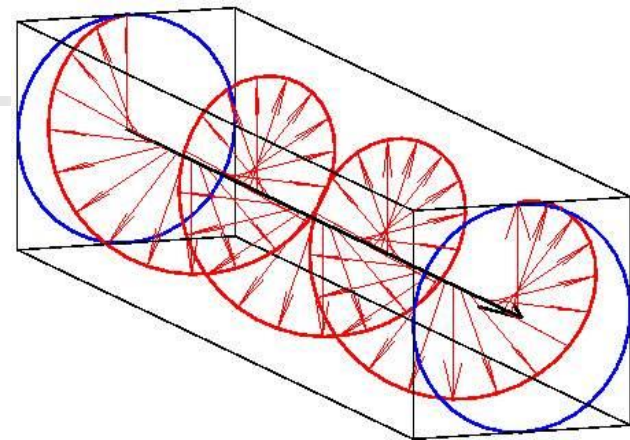


偏振光

符号表示

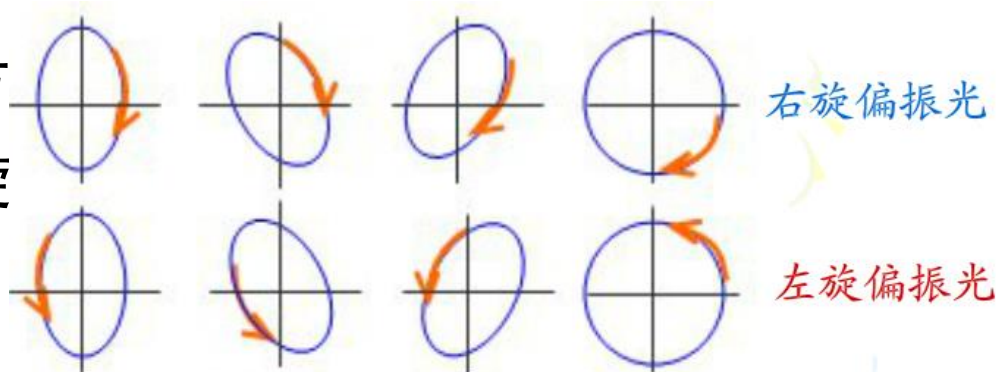


概念解释2：横波与纵波，偏振



圆偏振光和椭圆偏振光：

光矢量在垂直于光的传播方向的平面内按一定的频率旋转（左旋或者右旋）



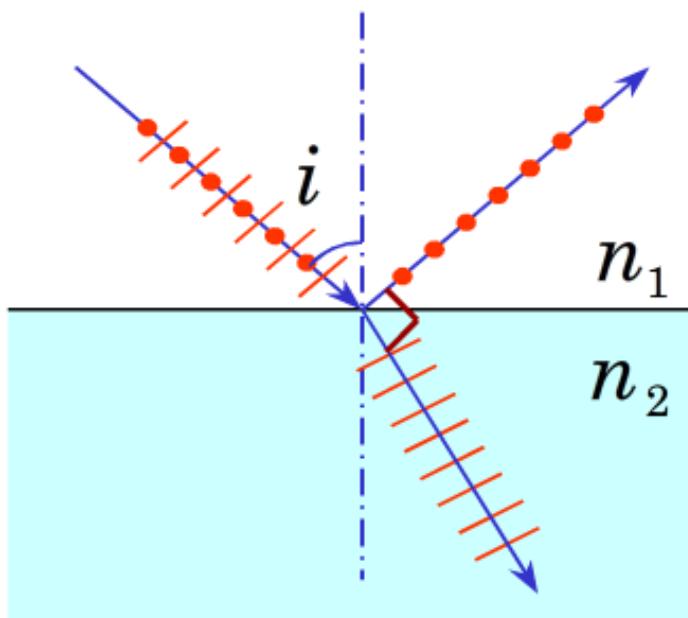
圆偏振光：光矢量的端点的轨迹是一个圆；

椭圆偏振光：光矢量的端点的轨迹是一个椭圆。

它们可用两个相互正交方向上有固定的位相关系的光振动来表示。

概念解释2：横波与纵波，偏振

自然光在反射和折射后成偏振光



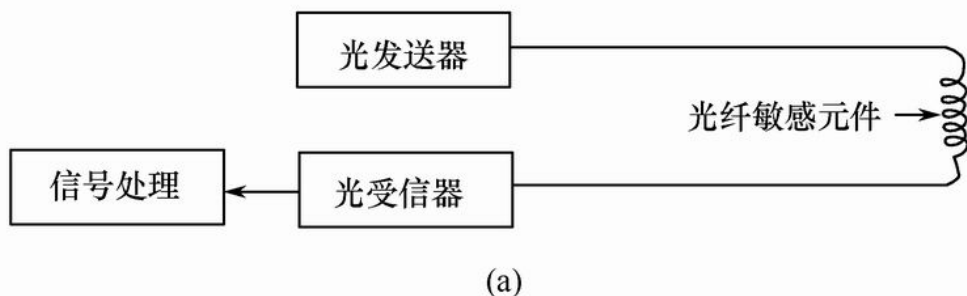
注：反射光E矢量垂直于纸面；
折射光E矢量在纸平面内。

自然光射到两种介质的界面上，如果光入射方向合适，使反射光和入射光垂直。

反射光和折射光都是偏振光，且偏振方向相互垂直。

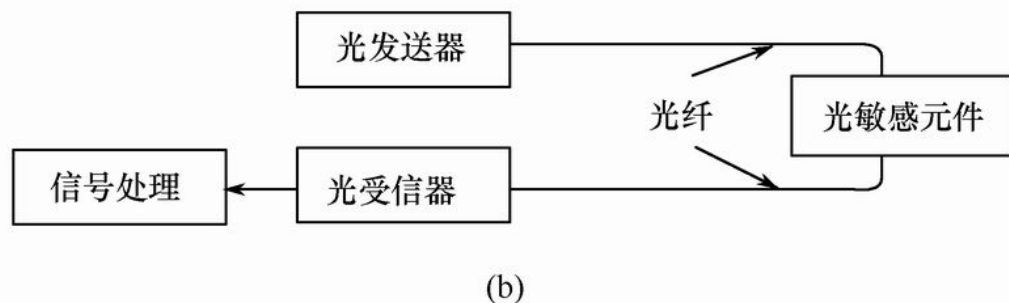
1.4 光纤传感器的分类

1.4.1 光纤在传感器中的作用



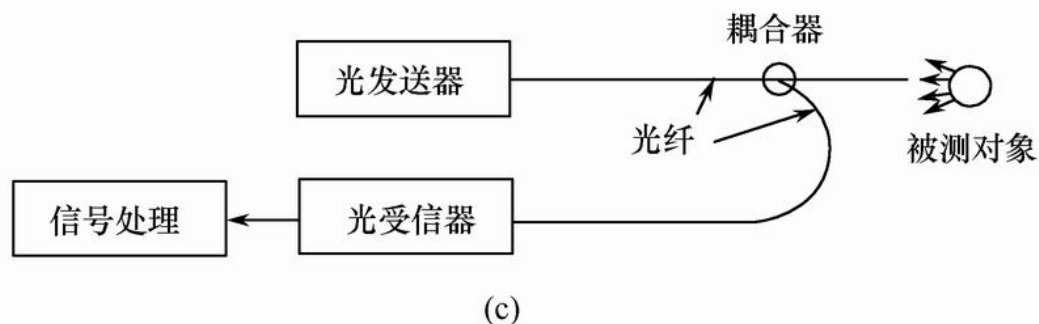
功能型

“传”和“感”合为一体



非功能型

只“传”不“感”



拾光型

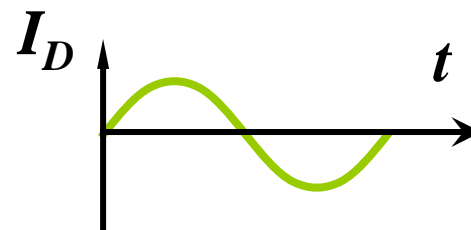
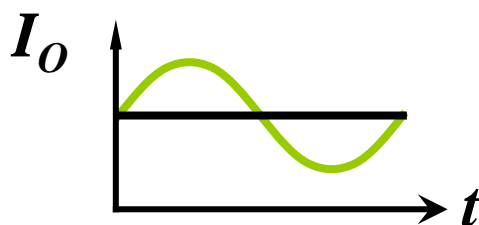
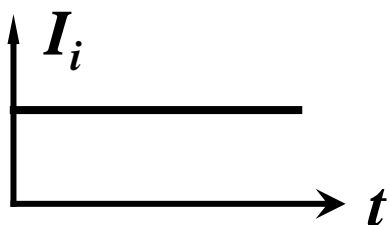
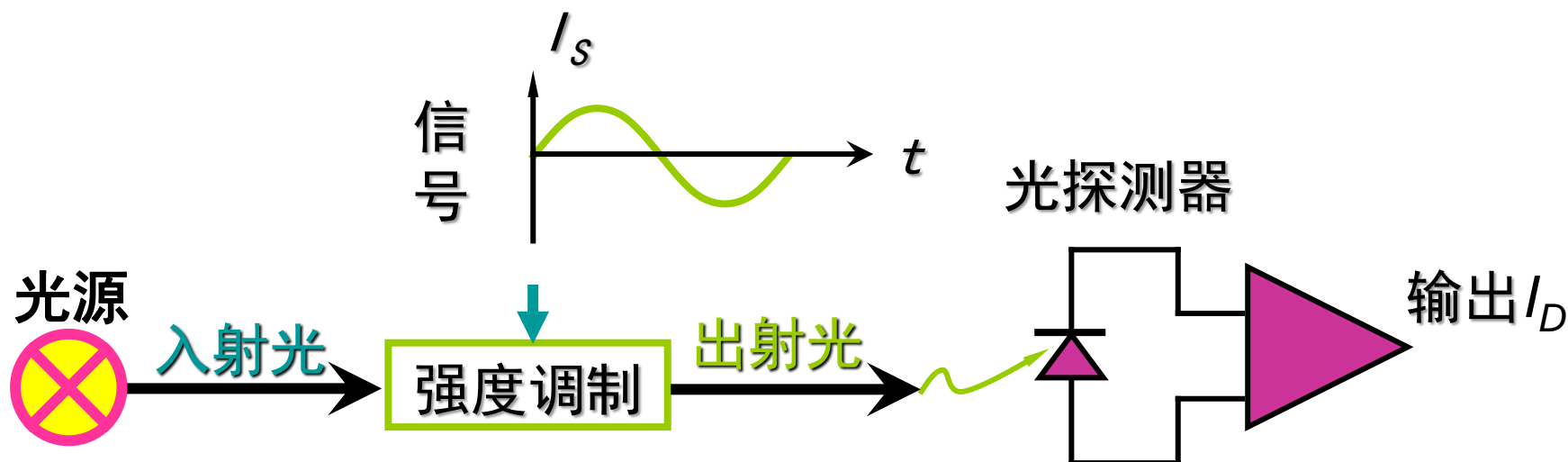
光纤作为探头，接收由被测对象辐射的光或被其反射、散射的光



1.4.2 根据光受被测对象的调制形式

- 1) 强度调制型光纤传感器
- 2) 偏振调制光纤传感器
- 3) 频率调制光纤传感器
- 4) 波长调制光纤传感器
- 5) 相位调制传感器

1) 强度调制型光纤传感器



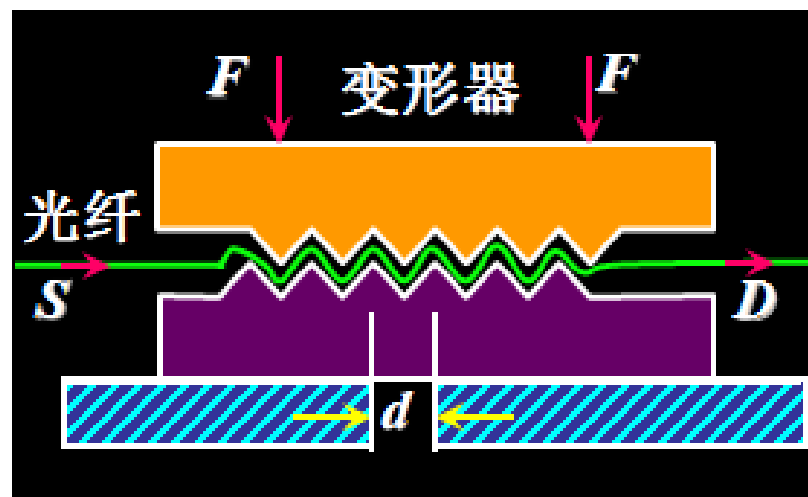
强度调制原理

1) 强度调制型光纤传感器

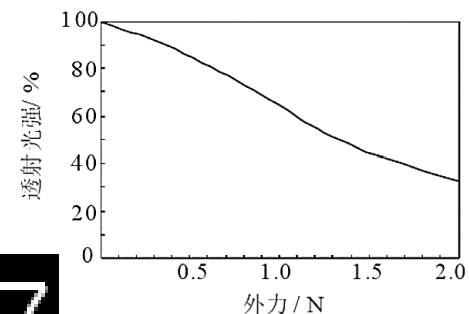
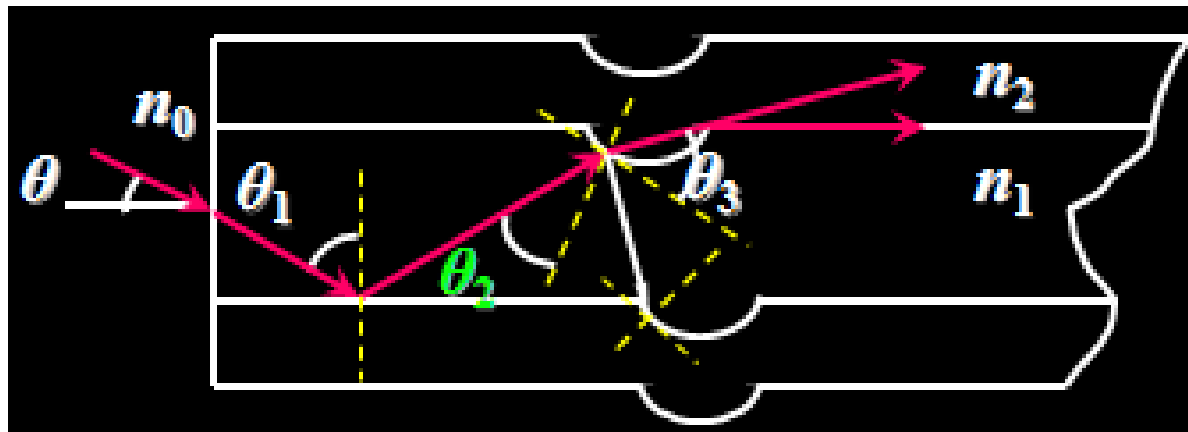
强度调制是被测对象引起载波光强度变化，从而实现
对被测对象检测的方式。

①光强度的内调制

【例】基于光纤的**微弯效应**，
即由压力引起变形器产生位移，
使光纤弯曲而调制光强度。



当光纤不受力时，光线从光纤中穿过，没有能量损失。
当锯齿板受外力作用而产生位移时，光纤则发生许多微弯，
这时在纤芯中传输的光在微弯处有部分散射到包层中。



原来光束以大于临界角 θ_c 的角度 θ_1 在纤芯内传输为全反射；但在微弯处 $\theta_2 < \theta_1$ ，一部分光将逸出，散射入包层中。当受力增加时，光纤微弯的程度也增大，泄漏到包层的散射光随之增加，纤芯输出的光强度相应减小。因此，通过检测纤芯或包层的光功率，就能测得引起微弯的压力、声压，或检测由压力引起的位移等物理量。

相邻两个波形槽之间的距离为 Λ
波动理论分析指出：当一对模的有效传播常数之差为

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

时，纤芯传播模与包层传播模之间的耦合程度最强。 β_1 和 β_2 分别为纤芯传播模的传播常数和包层辐射模的传播常数。

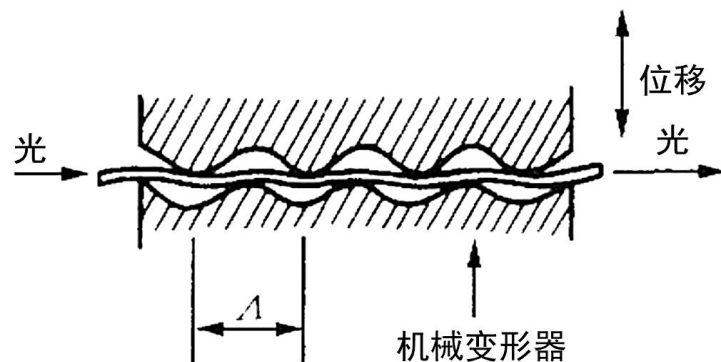
光在两传输模间产生耦合，从而进入光纤包层损失掉。

微弯效应造成的损耗如下

$$\alpha \propto f(\Lambda, m, A, r, R, \Delta)$$

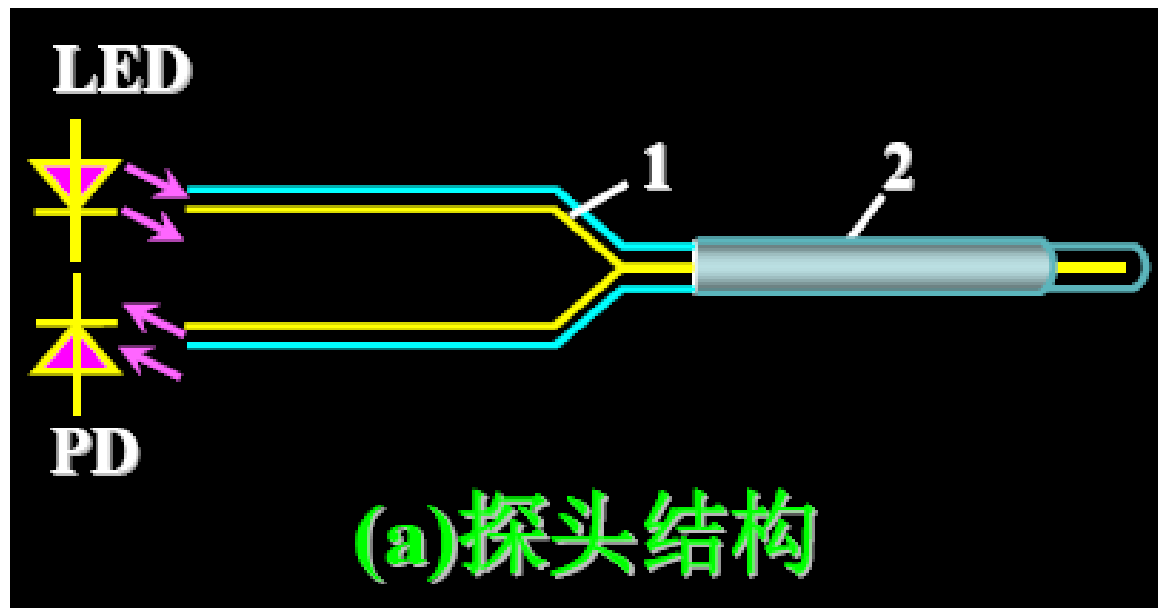
Λ —锯齿周期， m —锯齿数目， A —变形幅度

r —纤芯半径， R —包层半径， Δ —纤芯与包层的相对折射率



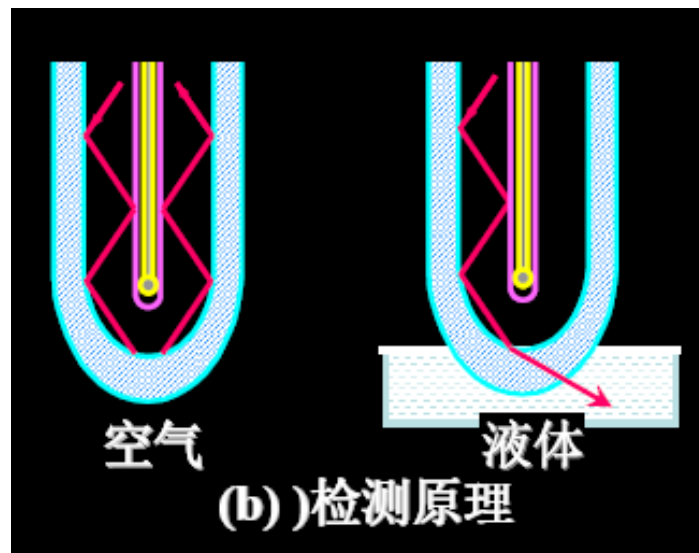
【例】球面光纤液位传感器

将光纤用高温火焰烧软后对折，并将端部烧结成球形。



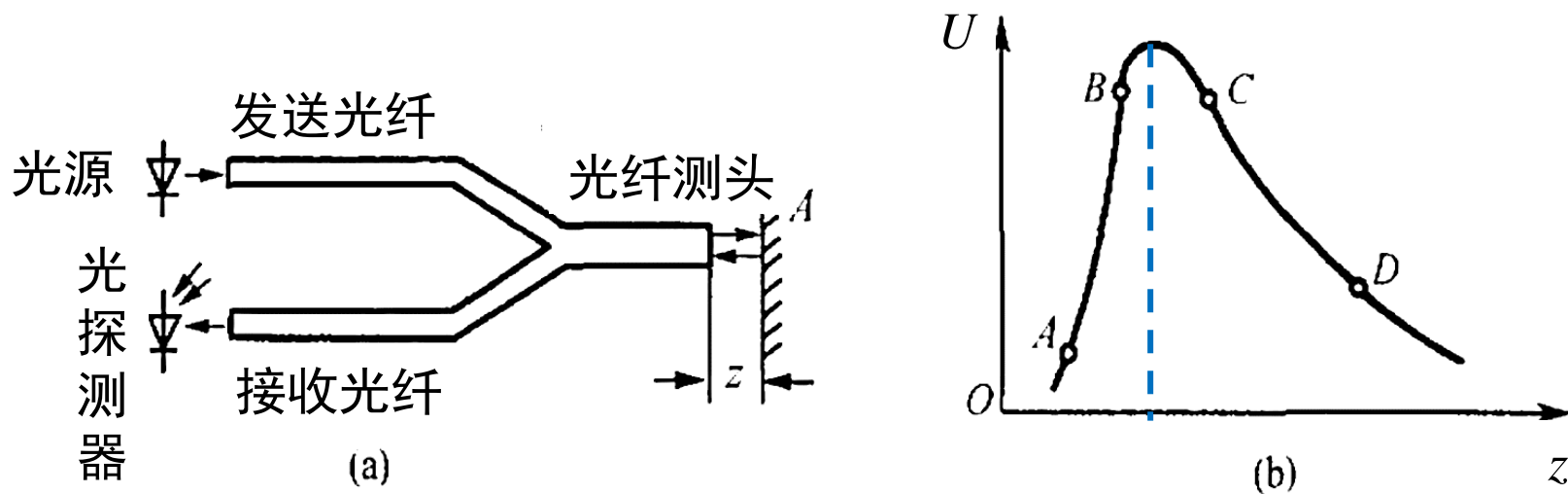
球面光纤液位传感器结构图

光由光纤的一端导入，在球状对折端部一部分光透射出去，另一部分光反射回来，由光纤的另一端导向探测器。**反射光强的大小取决于被测介质的折射率。**被测介质的折射率与光纤折射率越接近，反射光强度越小。显然，传感器处于空气中比处于液体中的反射光强要大。



②光强度的外调制

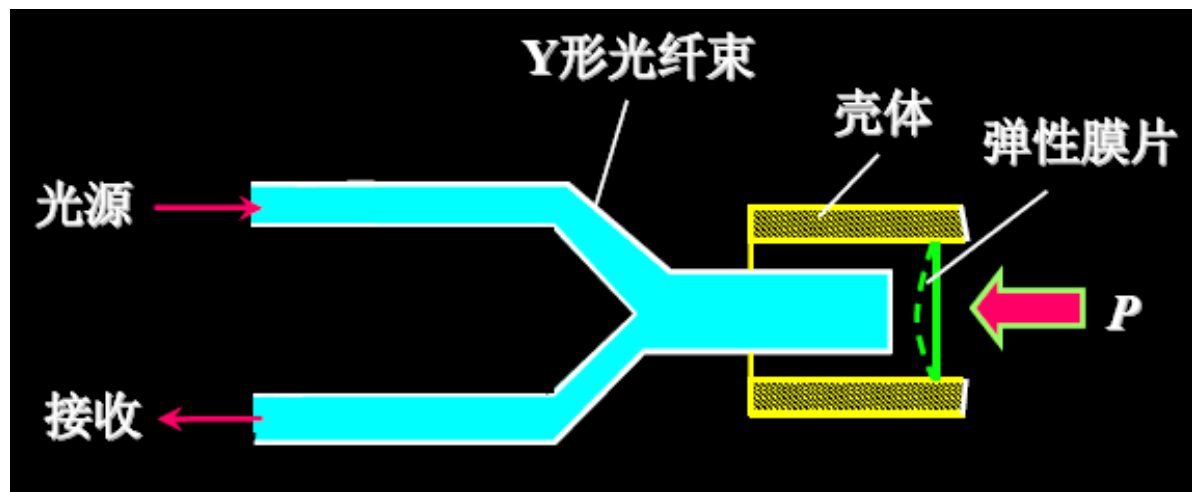
外调制技术的调制环节通常在光纤外部，光纤本身只传光。反射式强度调制器的机构原理如图：



原理结构和输出电压与位移关系图

通过测出反射光强度，可知物体位置的变化。
可测位移、压力等物理量。

【例】采用弹性元件的光纤压力传感器



膜片反射式光纤压力传感器示意图

膜片的中心挠度与所加的压力呈线性关系。

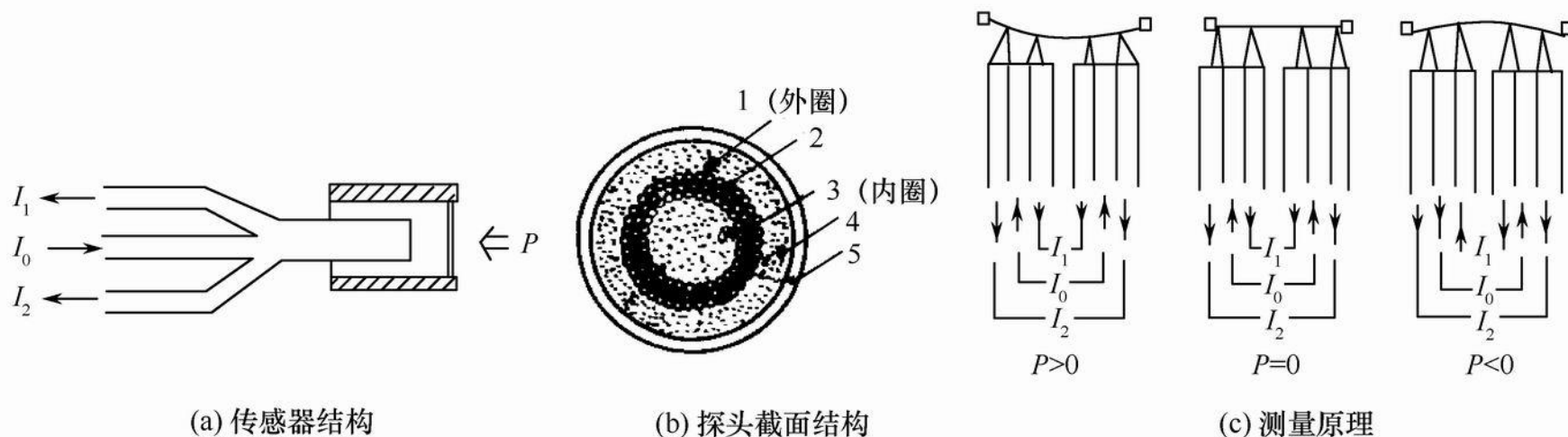
若利用Y形光纤束位移特性的线性区，则传感器的输出光强亦与待测压力呈线性关系。

结构简单、体积小、使用方便，光源不够稳定或长期使用后膜片的反射率有所下降，其精度就要受到影响。



接成差动形式

差动式膜片反射型光纤压力传感器



1. 输出光纤 2. 输入光纤 3. 输出光纤 4. 胶 5. 膜片

两束输出光的光强之比 $\frac{I_2}{I_1} = \frac{1 + Ap}{1 - Ap}$ A —常数
 p —待测量压力

输出光强比 I_2/I_1 与膜片的反射率、光源强度等因素均无关



将上式两边取对数，在满足 $(Ap)^2 \leq 1$ 时，得到：

$$\ln \frac{I_2}{I_1} = \frac{p}{2A}$$

表明待测压力与输出光强比的对数呈线性关系。
若将 I_1 、 I_2 检出后经对数放大后，再通过减法器，即可得到线性的输出。

用不同尺寸、材料的膜片，可获得不同的测量范围。



2) 偏振调制光纤传感器

利用光的偏振态的变化来传递被测对象信息
应用：

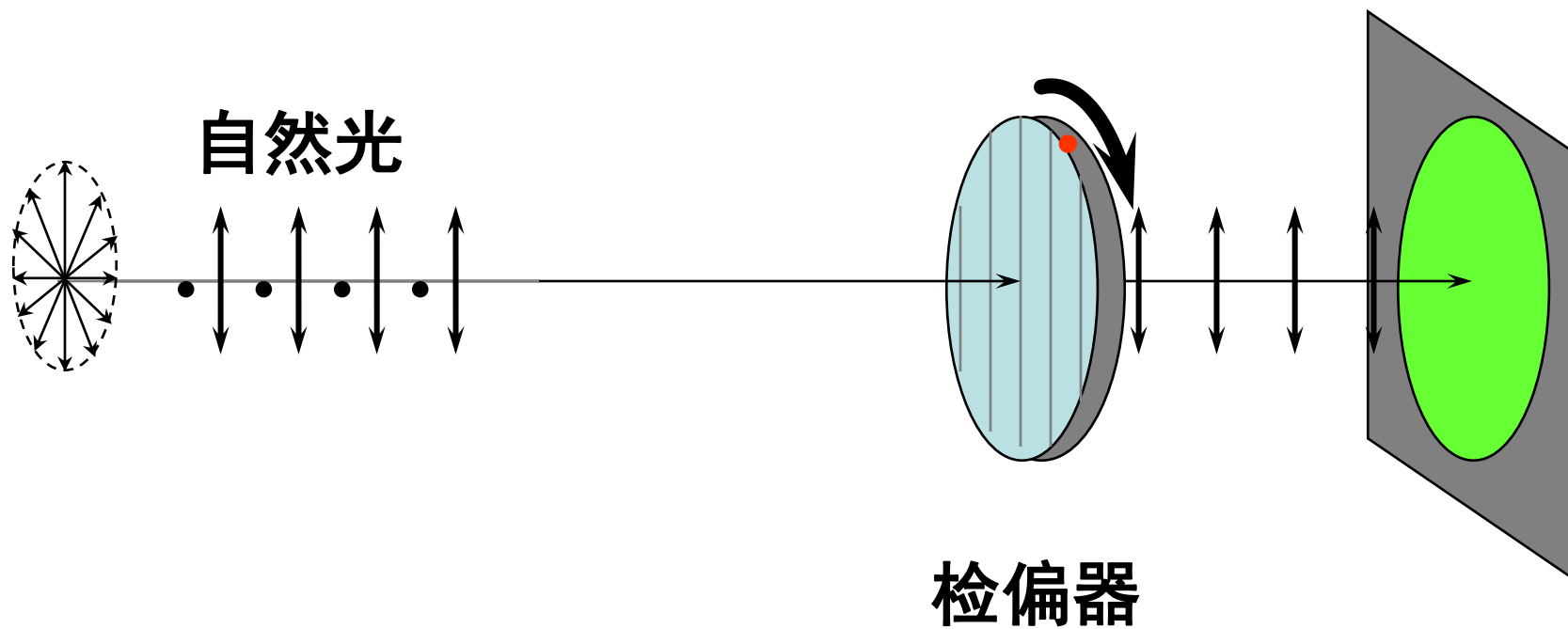
电流、磁场传感器：法拉第效应；

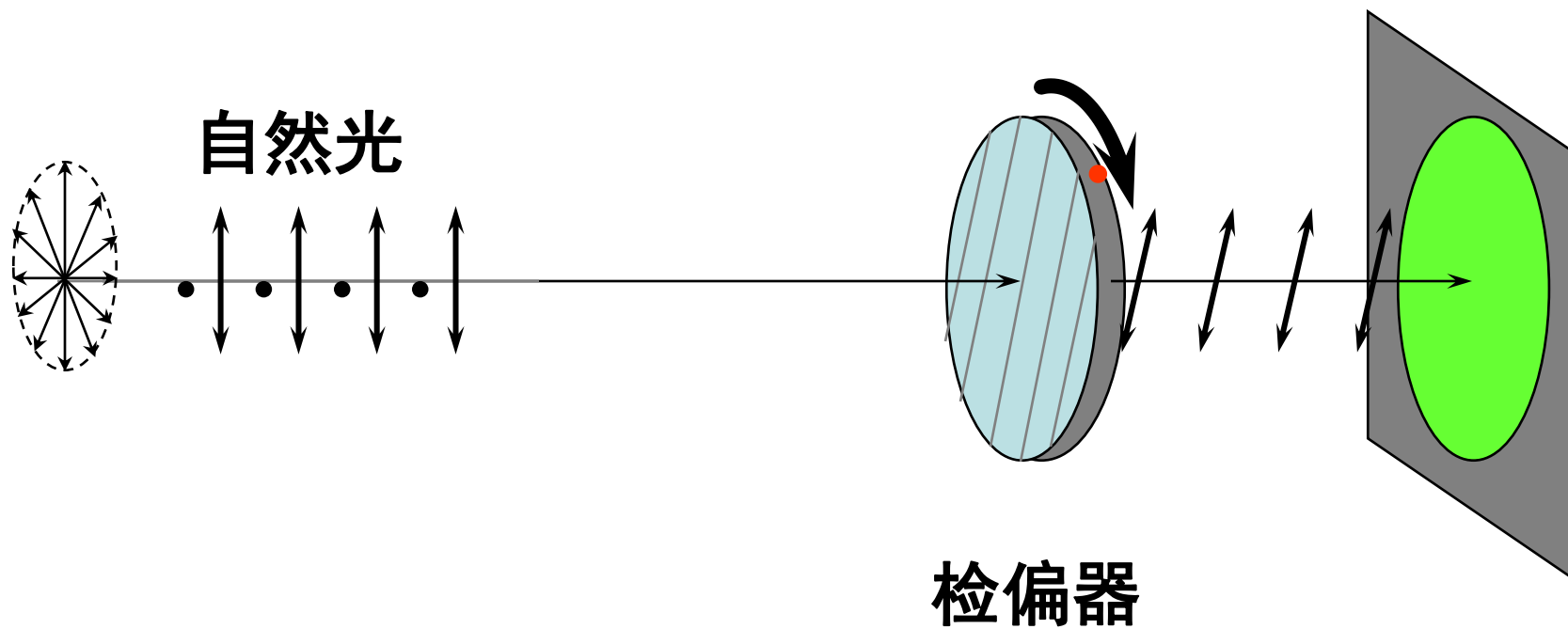
电场、电压传感器：泡尔效应；

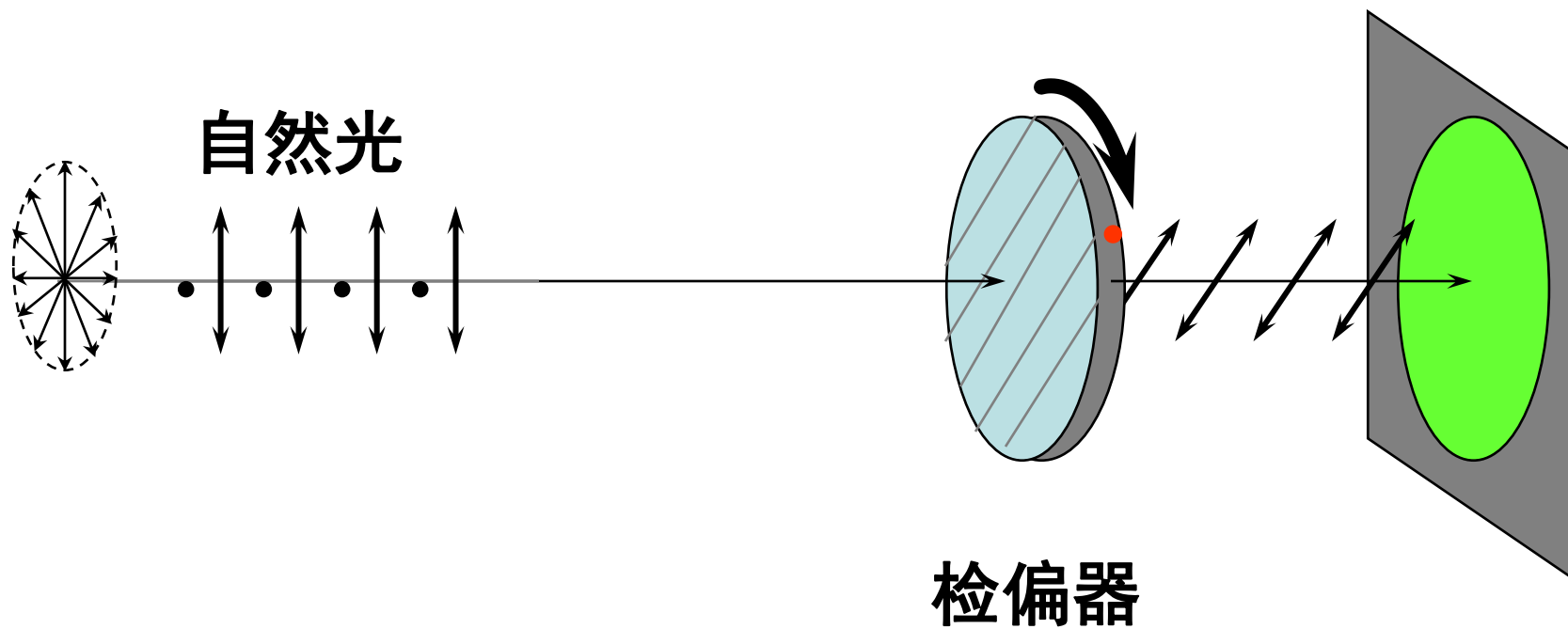
压力、振动或声传感器：光弹效应；

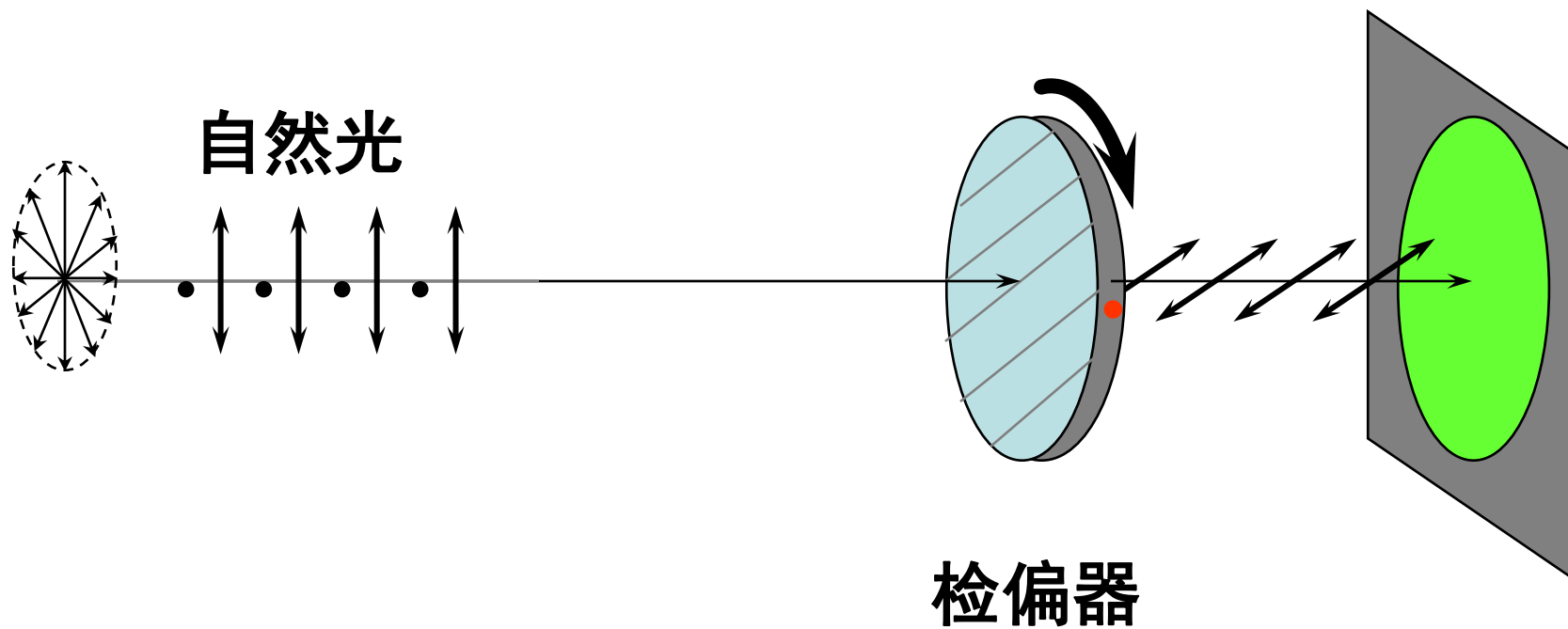
温度、压力、振动传感器：双折射性

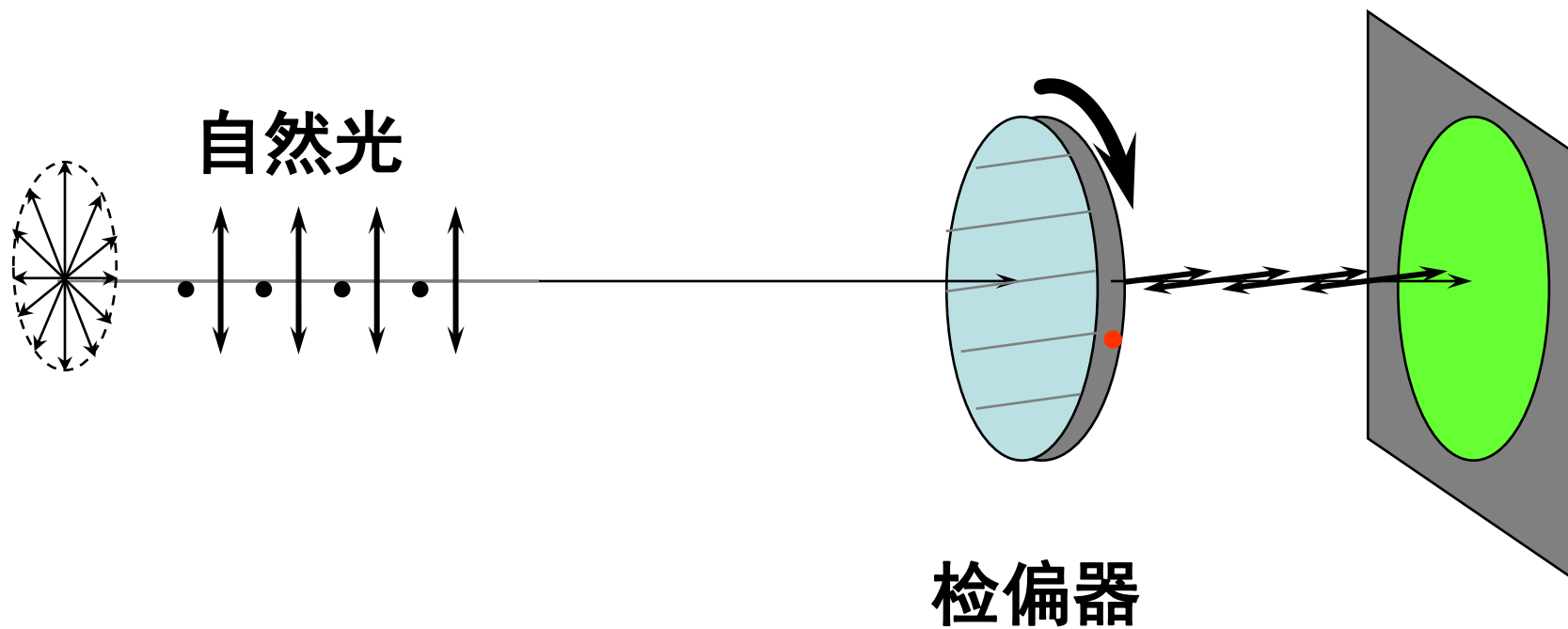
优点：可避免光源强度变化的影响，灵敏度高。

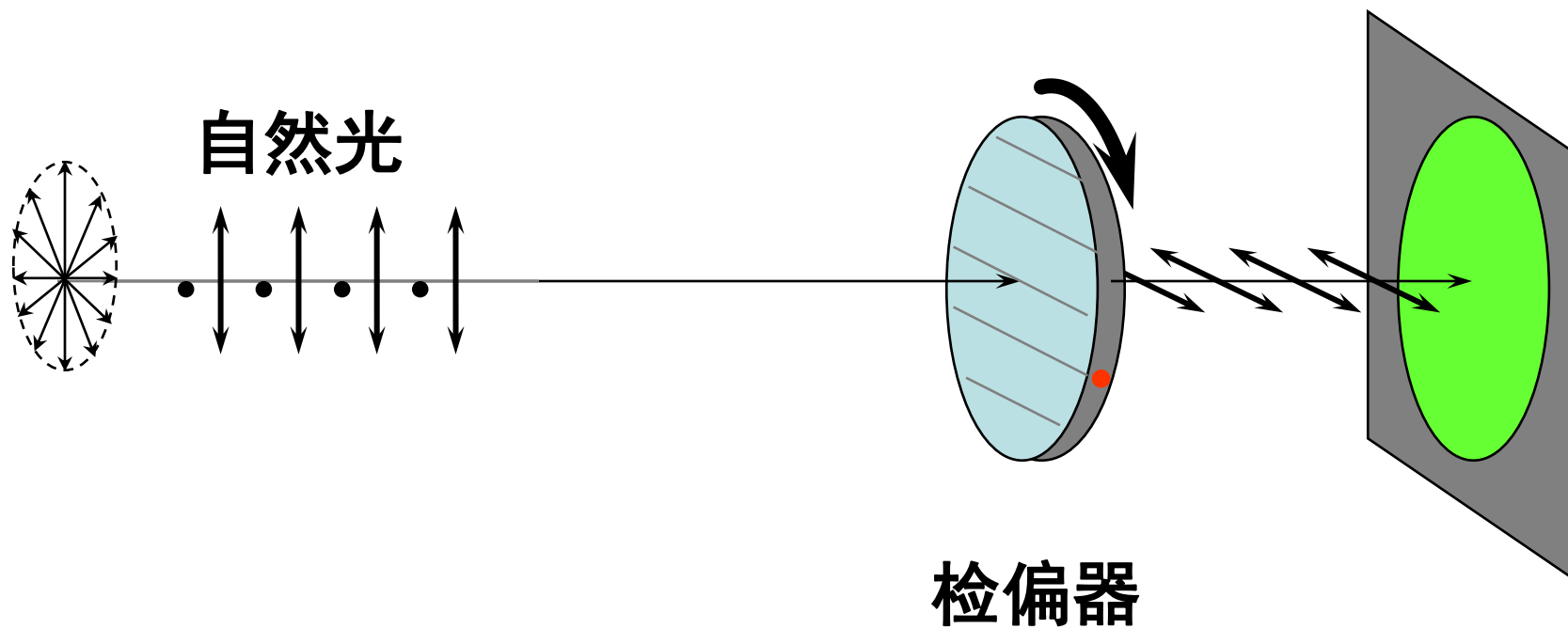


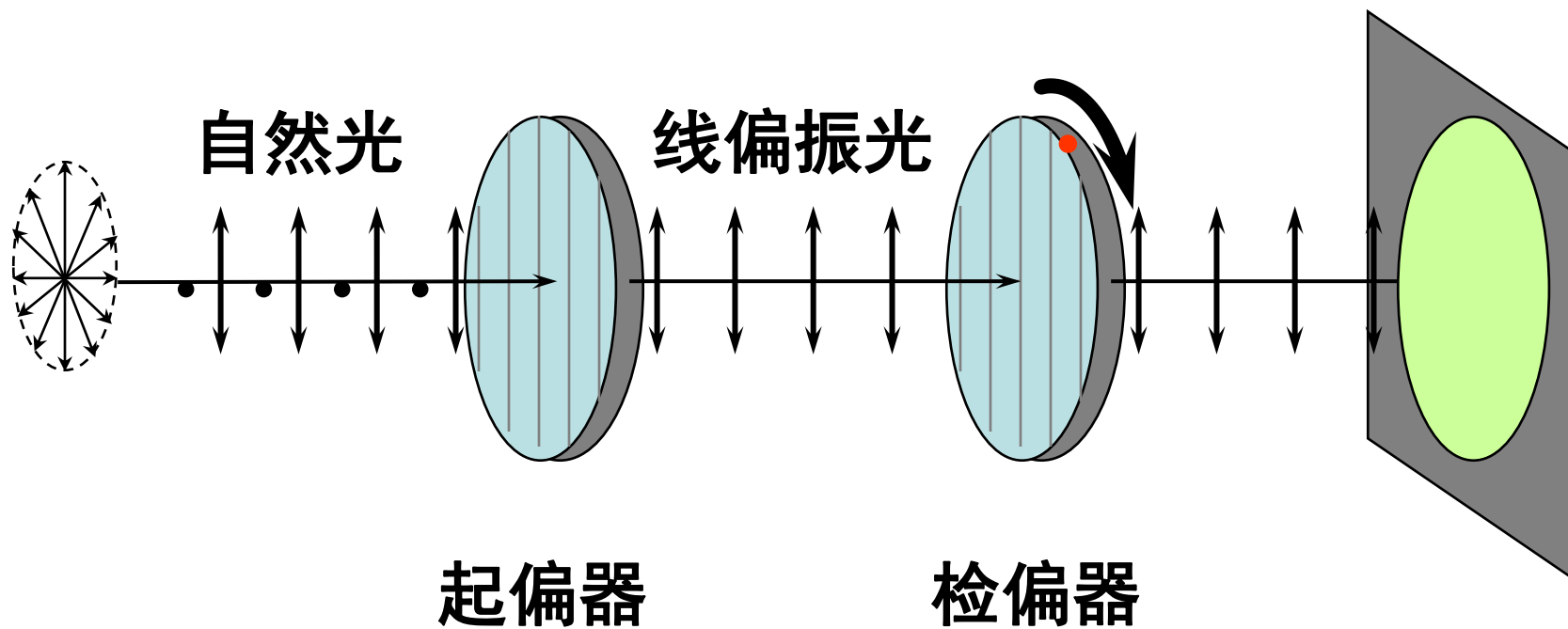


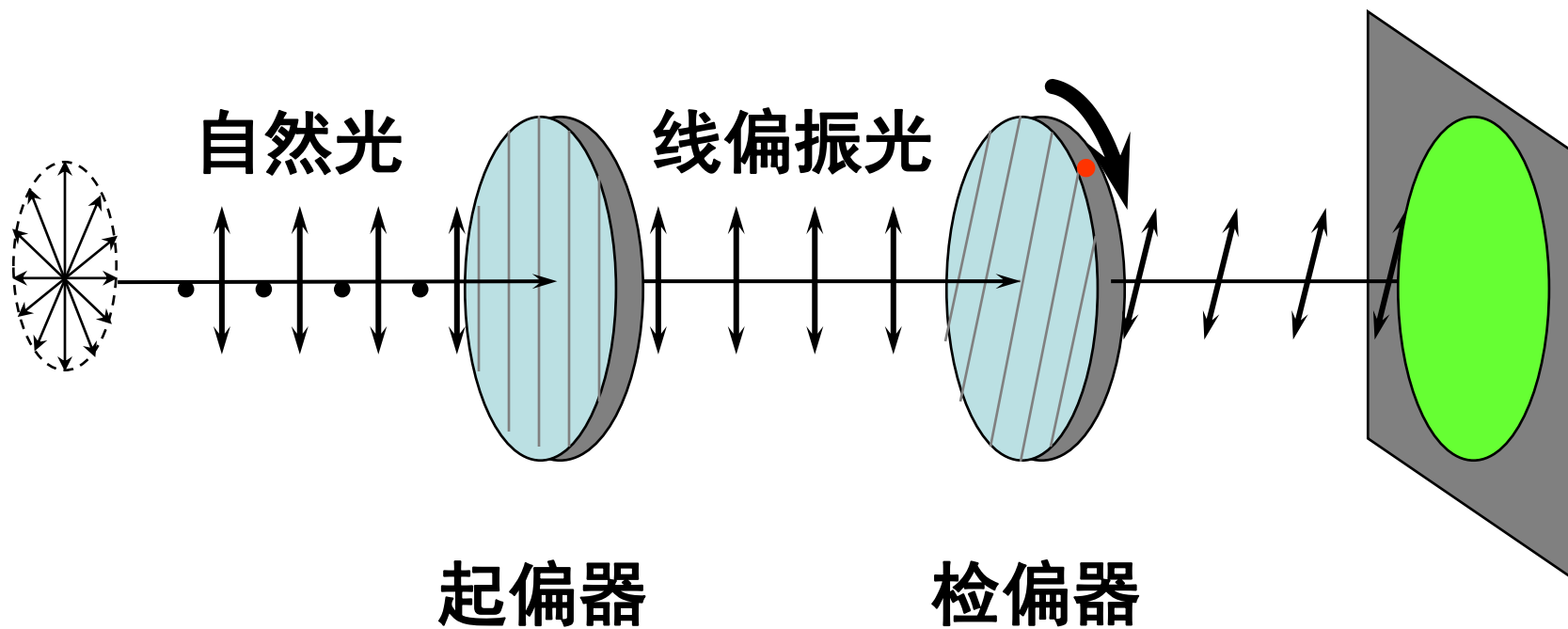


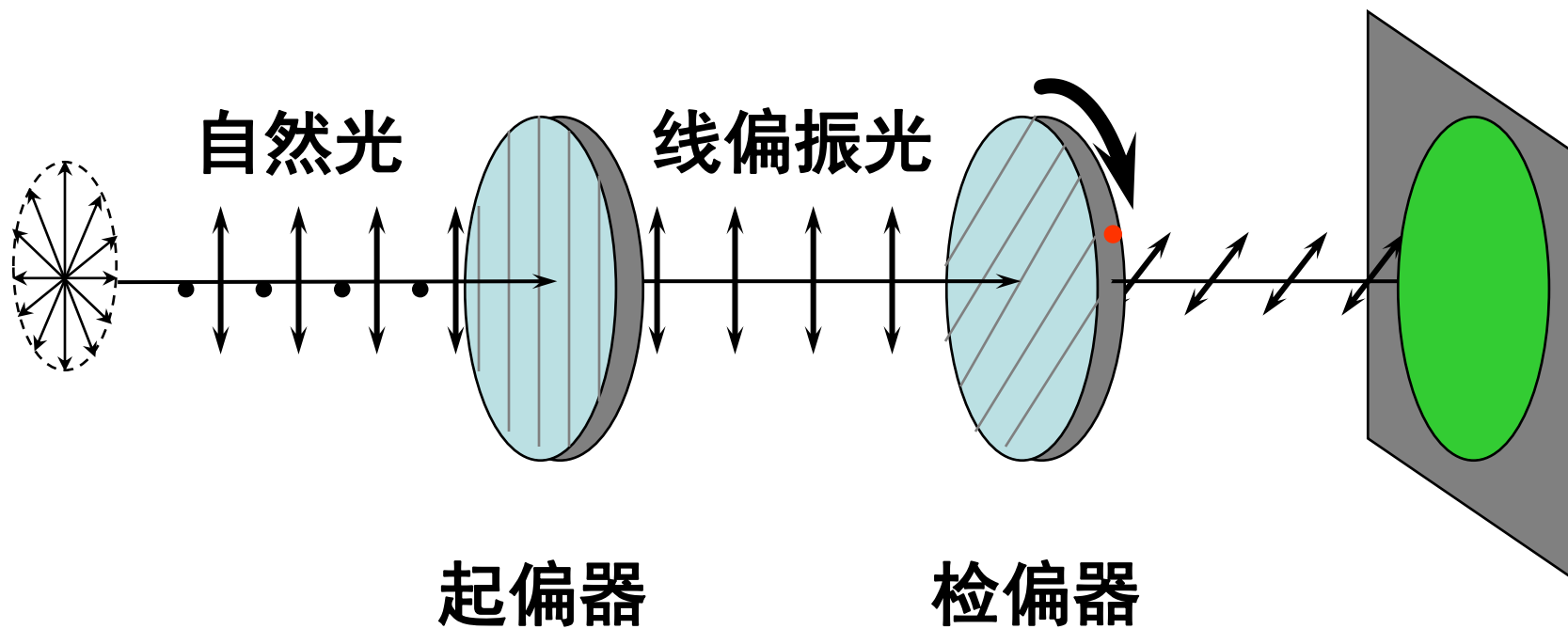


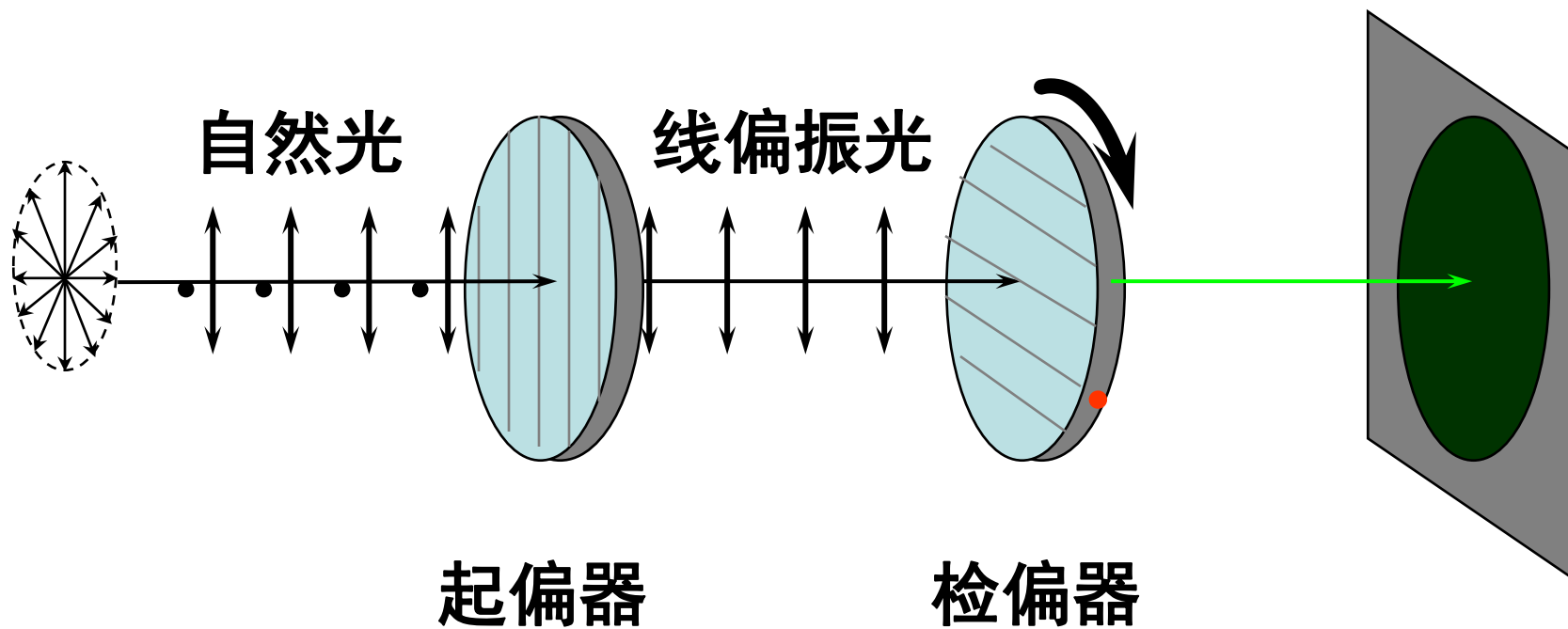




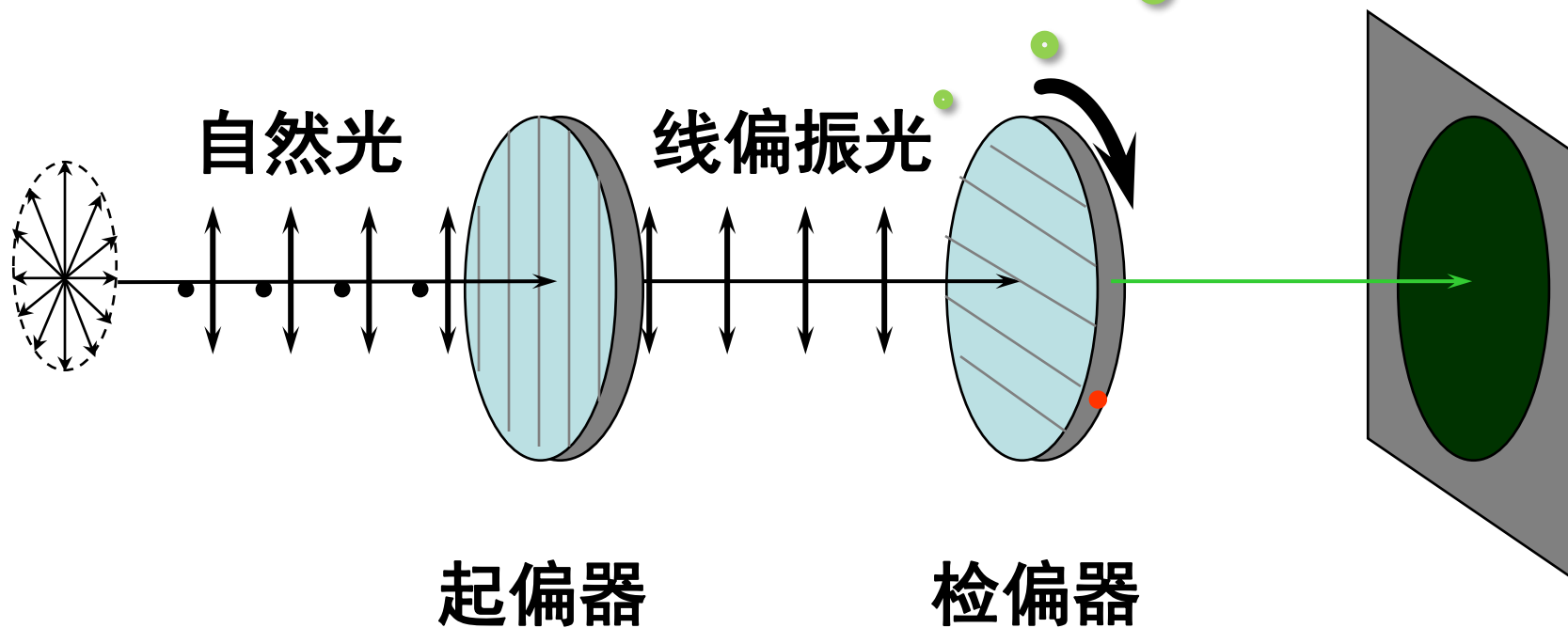








如何设计传感器？



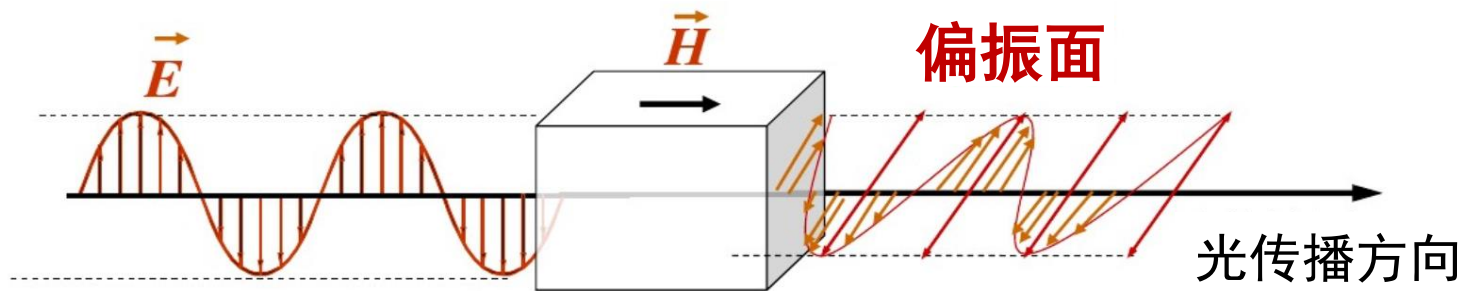
两偏振片的偏振化方向相互垂直，光强为零

【例】光纤电流传感器

电力系统中，会遇到在强电磁场干扰的情况下测量高压、大电流等电磁参量问题，光纤传感器优势突出。

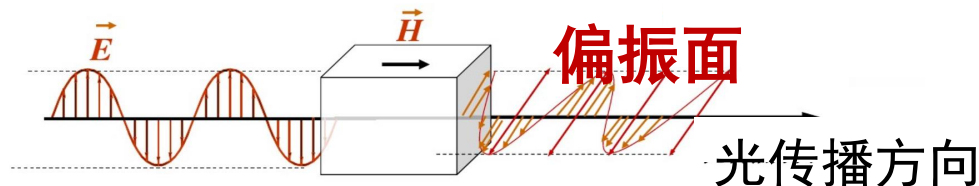
法拉第效应（磁光效应、磁致旋光）

某些物质在磁场作用下，**线偏振光**通过时其振动面会发生旋转。



旋转角 θ 值满足：

$$\theta = \mu VHL$$



【例】光纤电流传感器

$$\theta = \mu V H L$$

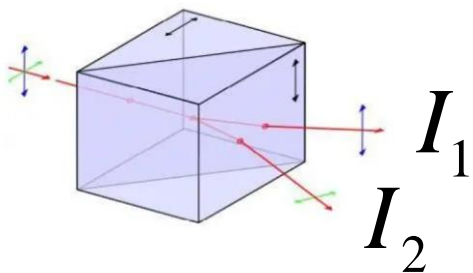
V — 物质的费尔德常量 (rad/A)

μ — 法拉第旋光材料的通光率

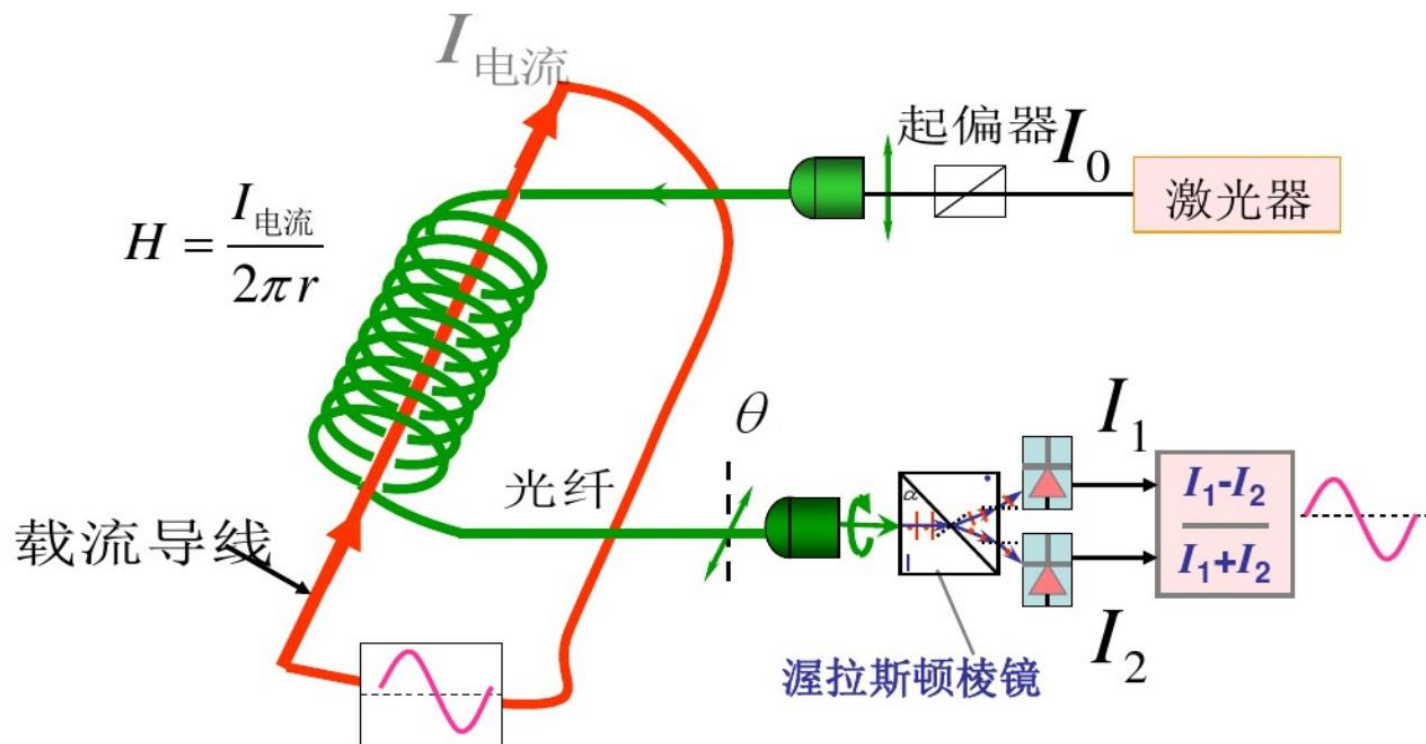
H — 磁场强度 (A/m)

L — 通过法拉第旋光材料的光程长度(m)

一般常用Wallaston棱镜代替检偏器，其输出光束分围两束正交的偏振光 I_1 和 I_2 ，利用下式，可得偏振光旋转角度，以及磁场强度 H 。



$$\theta = k(I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$$



光纤电流传感器原理示意图

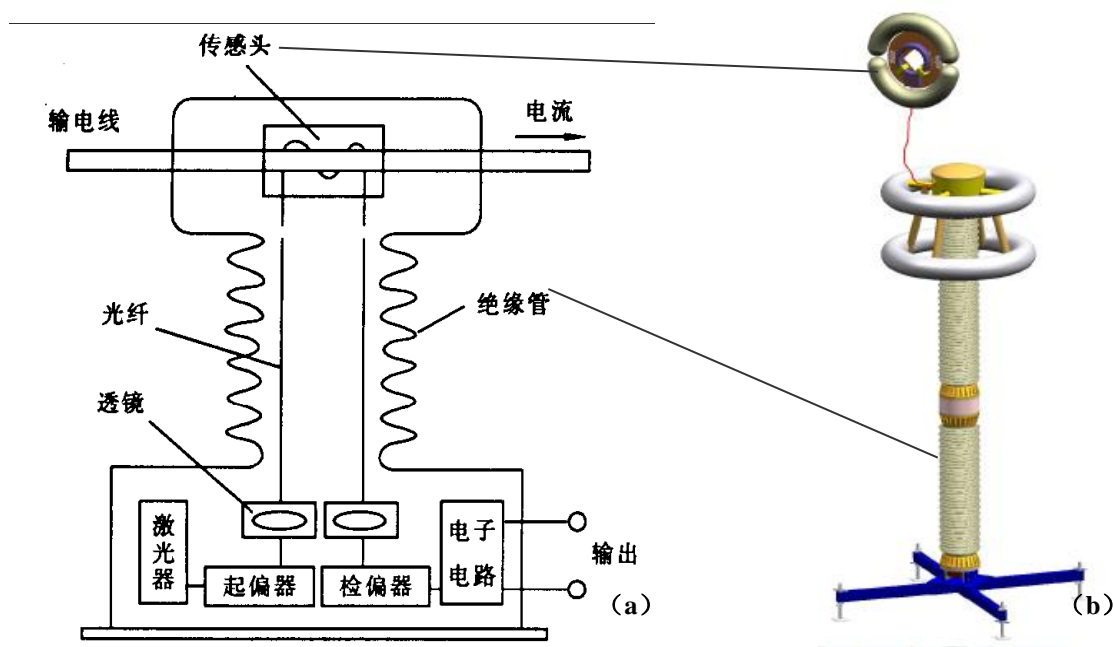
法拉第磁光效应，强度H的磁场中：

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

将单模光纤绕在载流导线上，形成一个半径为 r 的螺线管，光纤螺线管的光纤长度为 L 。

在强度为 H 的磁场作用下，通过光纤的线偏振光的振动面产生偏转，测出偏转角即可知导线电流 I 。

NxtPhase (Canada, 高压领域)



OVT进行-18℃的测试。





3) 频率调制光纤传感器

被测对象引起的光频率的变化来进行监测

利用运动物体反射光和散射光的多普勒效应的光纤速度、流速、振动、压力、加速度传感器；

利用物质受强光照射时的拉曼散射构成的测量气体浓度或监测大气污染的气体传感器；

利用光致发光的温度传感器等。



4) 波长调制光纤传感器

被测量与敏感光纤相互作用，引起光纤中传输光的波长改变，进而通过测量光波长的变化量来确定被测参量的传感方法。

在各种类型的波长调制型光纤传感器中，基于反射型（如光纤光栅）和透射性光波长敏感期间的光纤传感器主要用于应变、温度测量等领域；其他类型主要应用于医学、化学分析等领域，如对人体血气的分析、pH值的检测等。

4) 相位调制光纤传感器

被测对象导致光的相位变化，然后用干涉仪来检测这种相位变化而得到被测对象的信息。

利用光弹效应的声、压力或振动传感器；

利用磁致伸缩效应的电流、磁场传感器；

利用电致伸缩的电场、电压传感器

利用Sagnac效应的旋转角速度传感器（光纤陀螺）

优点：灵敏度很高

缺点：特殊光纤及高精度检测系统，成本高



1.5 光纤传感器的特点

- 1) 绝缘、无感应的电气性能；
- 2) 抗电磁干扰和原子辐射的性能，径细、质软、重量轻的机械性能；
- 3) 耐水、耐高温、耐腐蚀的化学性能，它能够在人达不到的地方（如高温区），起到人耳目的作用，而且还能超越人的生理界限，接收人的感官感受不到的外界信息；
- 4) 高灵敏度，比普通传感器高1-4个数量级；
- 5) 频带宽，动态范围大，光子作为信息载体，响应快速；
- 6) 容易实现对被测信号的远距离监控；
- 7) 可复用性强，采用多个光纤传感器可以构成分布式传感网络。

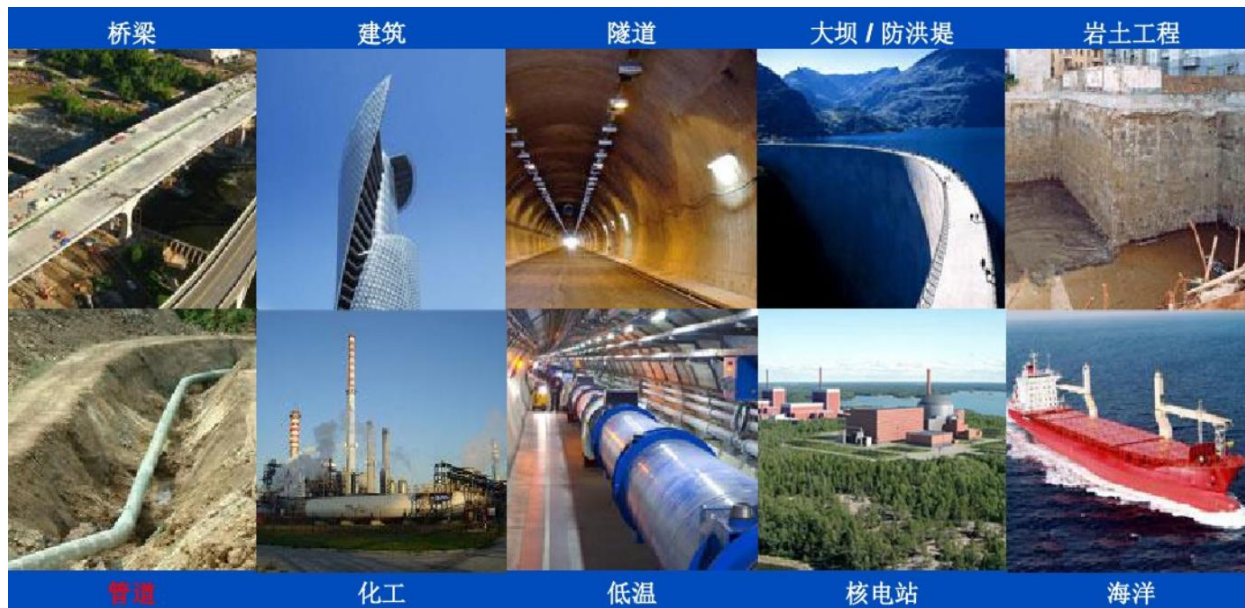


1.6 光纤传感器的应用

在众多的光纤传感器当中，分布式光纤传感器和光纤光栅传感器是光纤传感器中极具潜力的产品类别。

光纤传感器代表性应用：

- ① 分布式光纤传感器
- ② 光纤光栅传感器



① 分布式光纤传感器

利用**背向散射效应**实现光纤沿线的物理参量测量，并利用**光时域反射OTDR**（optical time-domain reflectometer）实现事件位置定位，具备多事件同时定位功能。

背向散射：光纤自身反射回的光信号称为背向散射光，简称背向散射。

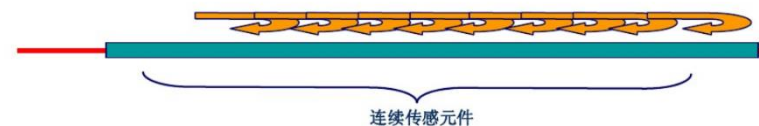
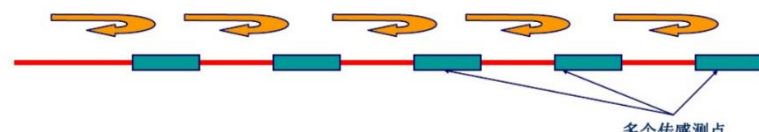
光纤中的散射信号主要包括三类：

- 拉曼散射，由光学声子引起
- 瑞利散射，由折射率起伏引起
- 布里渊散射，由声学声子引起

单点传感器

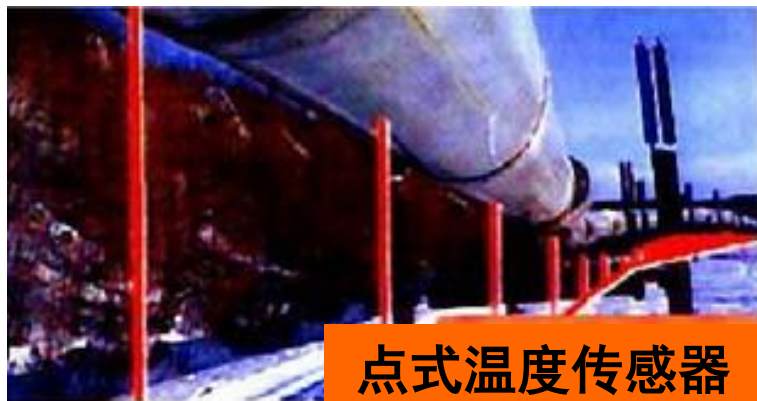


多点 (准分布式) 传感器



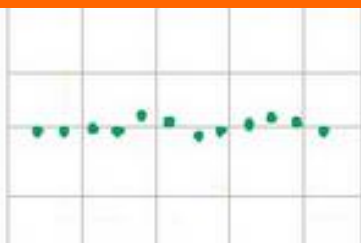
分布式光纤传感器特点：

使用普通光纤和小型终端设备，
实现长距离、大范围、高密度的监测。

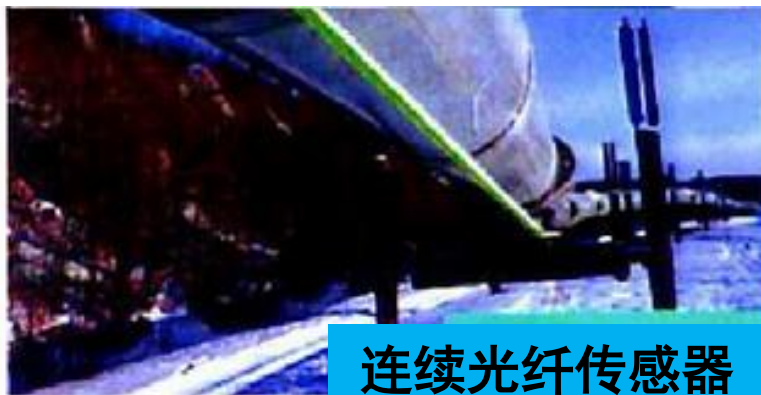


点式温度传感器

温度



距离



连续光纤传感器

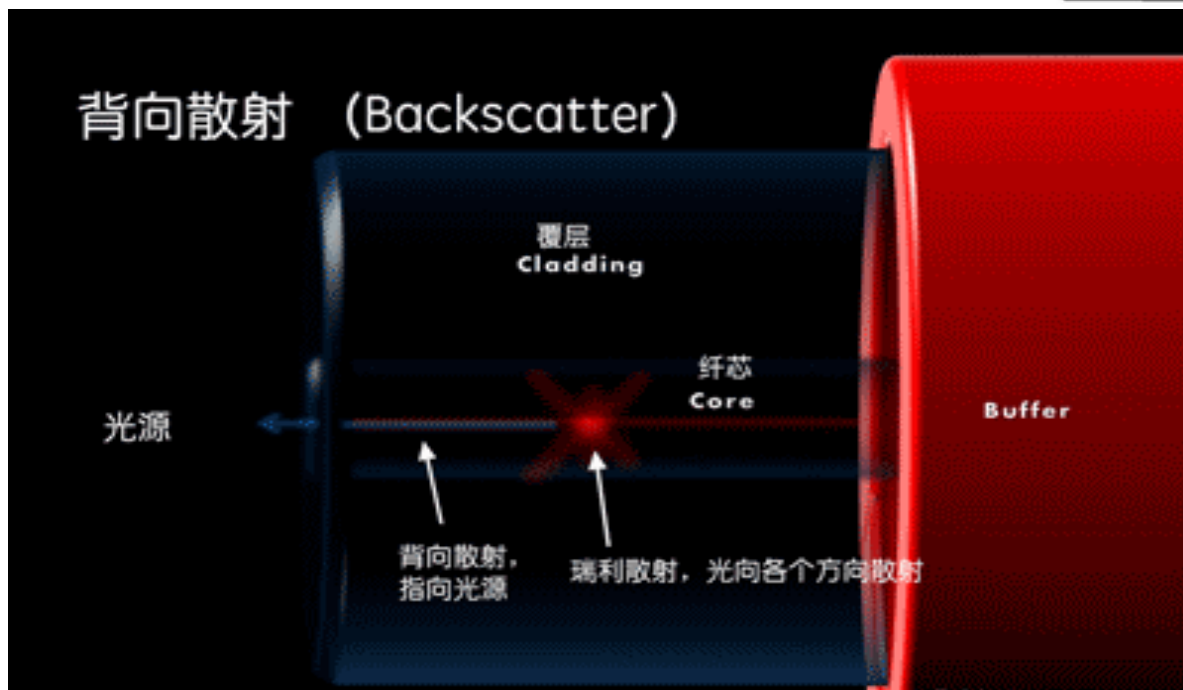
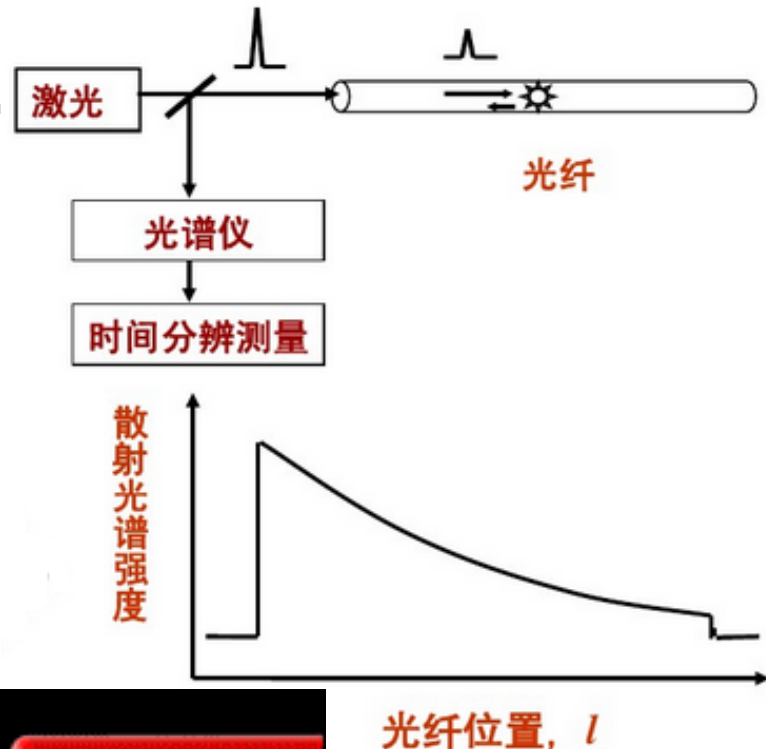
温度



距离

光时域反射技术--OTDR

散射类光纤传感器基础，通过向光纤中注入脉冲激光，并接受光纤内的背向散射光实现传感，外部事件会对后向散射光的幅度、相位、波长（频率）和偏振态产生影响。



背向散射 (Backscatter)



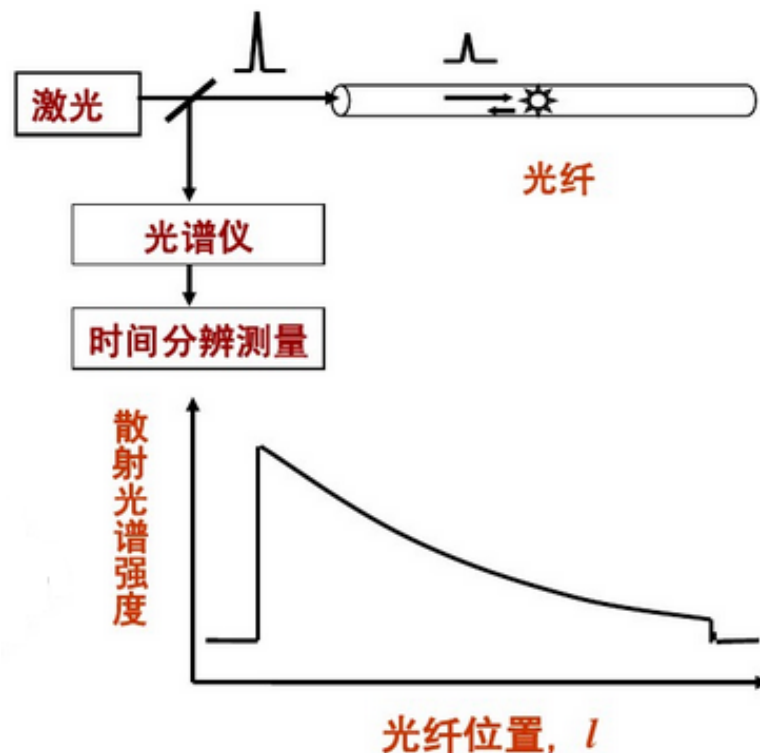
光时域反射技术--OTDR

利用测量脉冲到散射信号返回的时间差 t ，可以得出散射发生的位置 l 为

$$l = \frac{vt}{2} = \frac{ct}{2n}$$

其中： v 为光纤中光波传播速度， c 真空光速， n 折射率

测量不同时间差的发射信号光谱强度，可以得到不同位置的传感量。

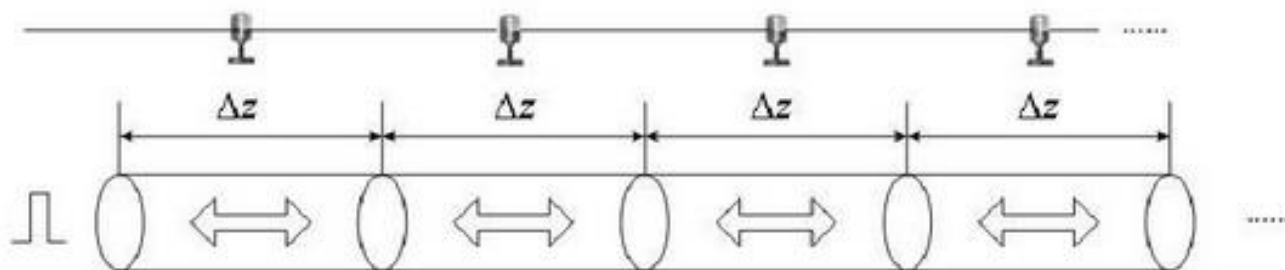


根据激光测距原理可知，光脉冲的重复频率决定了可监测的光纤长度，而光脉冲的宽度决定了空间定位精度。

基于OTDR技术的传感器均有类似的空间分辨率，其表达式如下：

$$\Delta z = \frac{cT}{2n}$$

其中： c —真空光速， n —折射率， T —脉冲宽度



如10ns脉冲宽度对应的空间分辨率为1m。



以混凝土结构为例，说明光纤传感器工程应用的难点：

- 1) 光纤传感器无损伤地埋入混凝土结构的工艺问题
- 2) 混凝土中的高水、高碱环境对光纤的损害问题
- 3) 光纤传感器在结构有效期内的可靠性和长期稳定性问题

有3种方法可供参考：

- 1) 采用金属管件保护，光纤放入金属保护管，带混凝土浇筑完成后，轻轻去除金属管；
- 2) 浇筑层面上埋设光纤；
- 3) 制作一块薄板，将光纤铺设在薄板中，再将薄板埋入机构中或粘贴在机构表面，结构产生裂缝时，薄板也随之断裂。

分布式光纤传感器系统原理是同时利用光纤作为传感敏感元件和传输信号介质，可以探测出沿着光纤不同位置的温度和应变的变化，实现真正分布式的测量。



油气管线监测



大坝监测

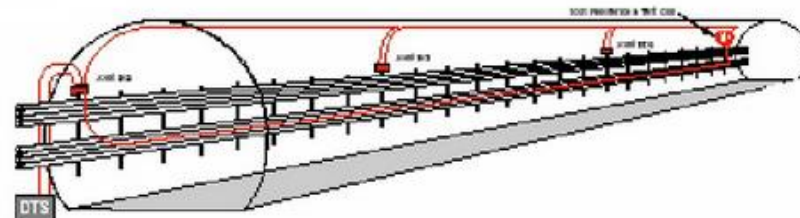
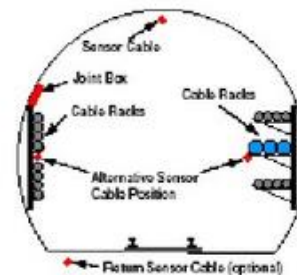


油气井监测



桥梁及建筑物监测

发电厂电缆夹层火情监测



混凝土梁/高速公路监控 HW40, Brahim Benmokrane博士（加拿大舍布鲁克大学）





电力线监测



边境安全监测



高速路安全监测

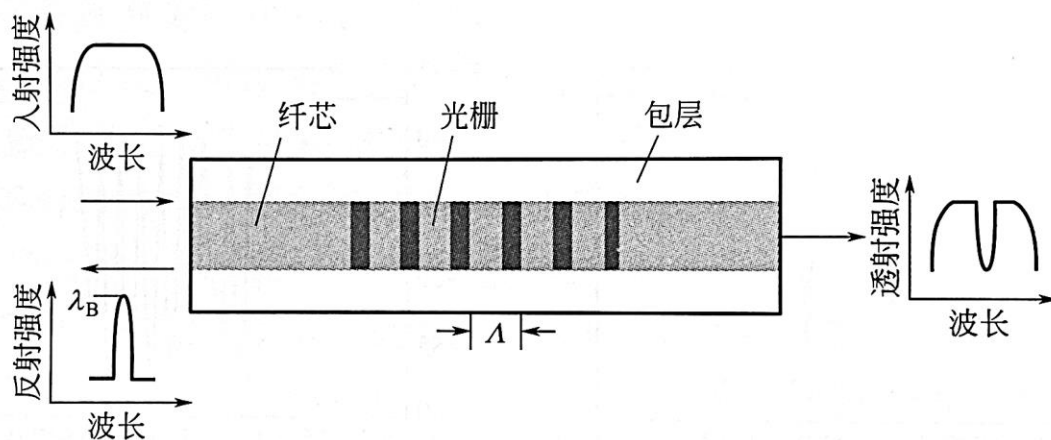
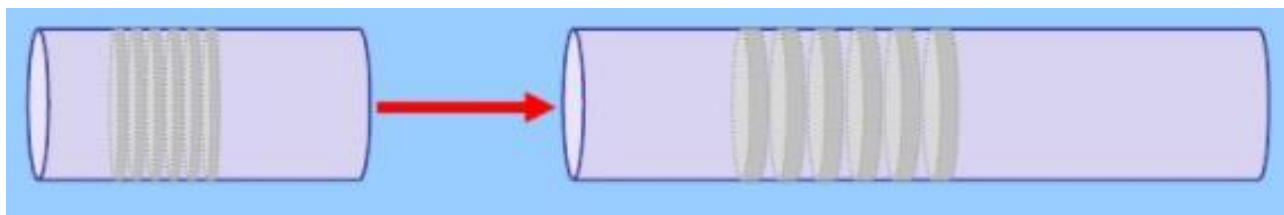


建筑物火警预报

②光纤光栅传感技术

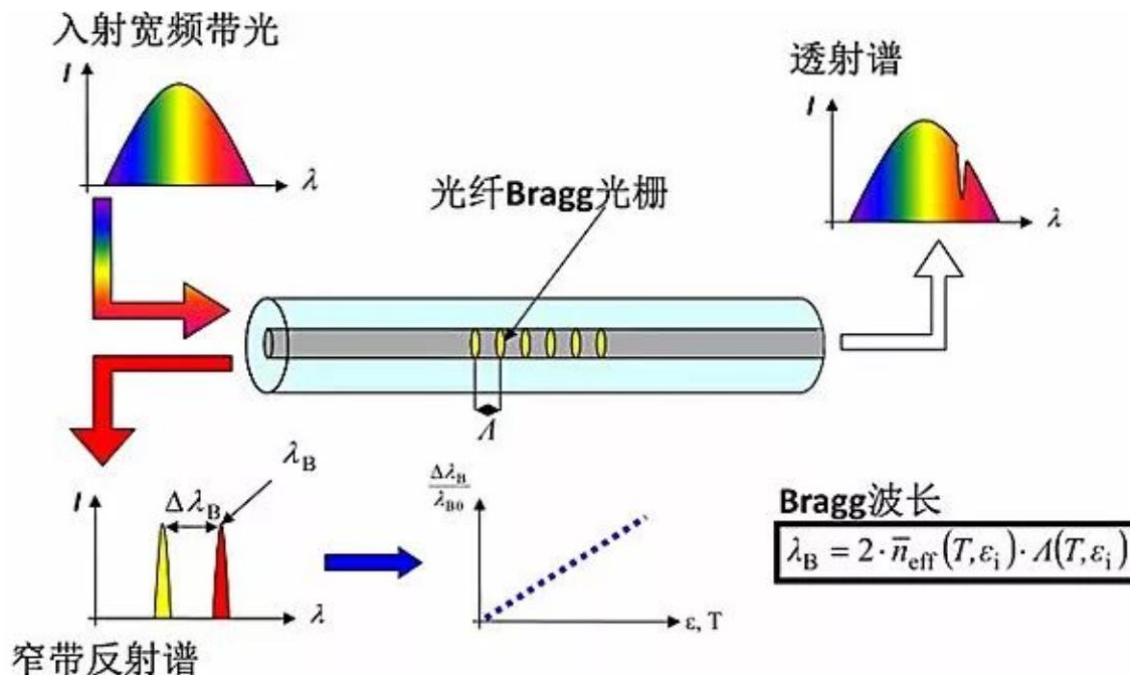
光纤Bragg光栅传感器介绍：

在光纤上用紫外光刻写光栅，使纤芯折射率发生周期性变化，如10mm的光纤光栅包含了10000个在纤芯中规则分布的微小反射镜面。



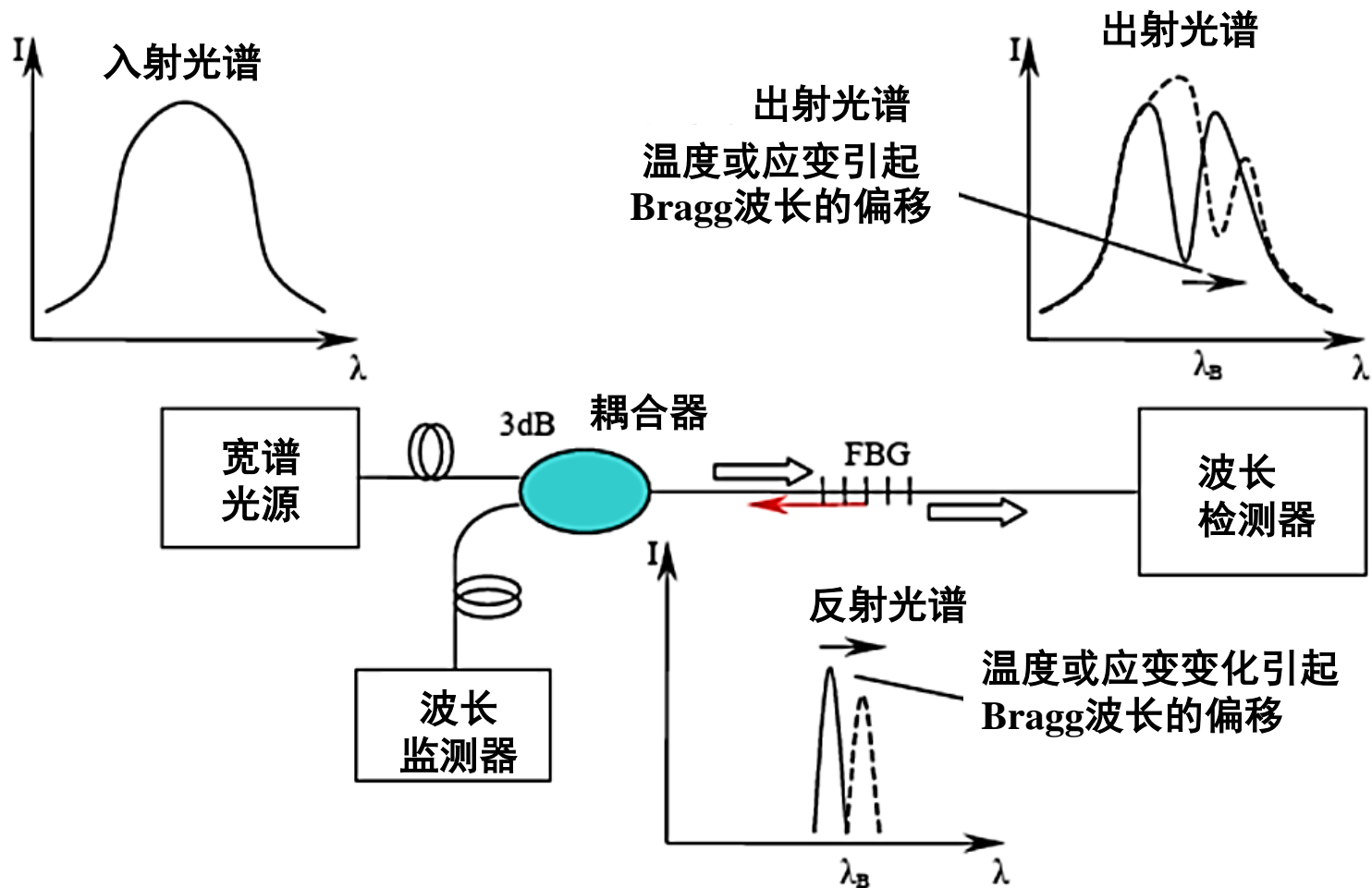
光纤光栅传感原理:

当一束宽带光经光纤到达光纤光栅后，会有以谐振波长 λ_B 为中心波长的一个窄带光谱被反射，其他波长的光透射。



温度/应变等物理量的变化与所导致的栅距变化呈线性，光栅反射波长随栅距变化而线性变化。

光纤光栅传感原理:





光纤光栅传感原理：

对于光纤通信而言，布拉格波长越稳定越好。而基于光纤光栅的传感技术是利用布拉格波长随着外界环境的变化而变化这一特点。

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$$

FBG传感的基本原理是利用折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 对外界参量的敏感特性，对上式进行全微分得：

$$d\lambda_B = 2 \cdot \Lambda \cdot dn_{eff} + 2 \cdot n_{eff} \cdot d\Lambda$$

可改写为：

$$\Delta\lambda_B = 2 \cdot \Lambda \cdot \Delta n_{eff} + 2 \cdot n_{eff} \cdot \Delta\Lambda$$

热光效应（温度）
或轴弹光效应（轴
向应变）

热膨胀（温度）
或轴向形变（轴
向应变）



➤ 应力应变传感

为了建立光纤光栅应力应变传感模型，假设如下：

- 光纤光栅结构**仅包括纤芯和包层**，忽略所有外包层影响；
- 在所测的引力应变范围内，**石英光纤是理想弹性体**，遵循胡克定律；
- 光纤写制过程中引起的光敏折射率变化在光纤横截面上**分布均匀**，且写制过程不影响光纤的**各向同性**特性；
- **所有应力均为静应力**，不考虑时间变化。光纤光栅在大多数情况下用于测量轴向应变，轴线应变发生的同时会引起横向应变的产生，被称为波导效应。因为波导效应微弱，对光纤光栅轴向应变测量灵敏度的影响很小，常被忽略。



基于上述条件，当光纤光栅发生均匀轴向应变时，其反射中心波长 λ_B 与轴向应变 ε_z 成正比：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \varepsilon_z$$

p_{11}, p_{12} 为应变-光学系数， ν 为泊松比

定义 S_ε 为光纤光栅的波长-应变灵敏度系数，则有

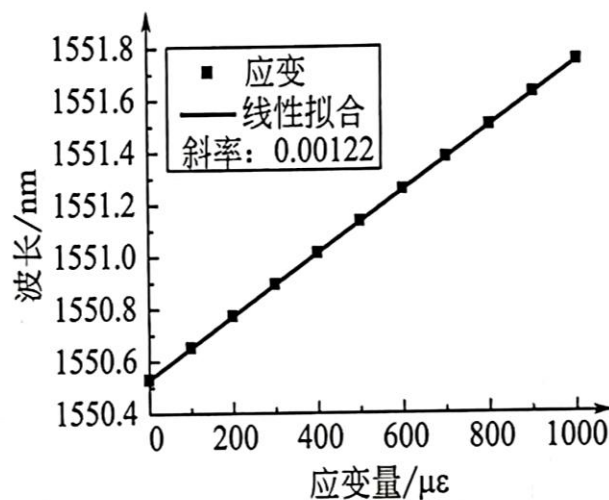
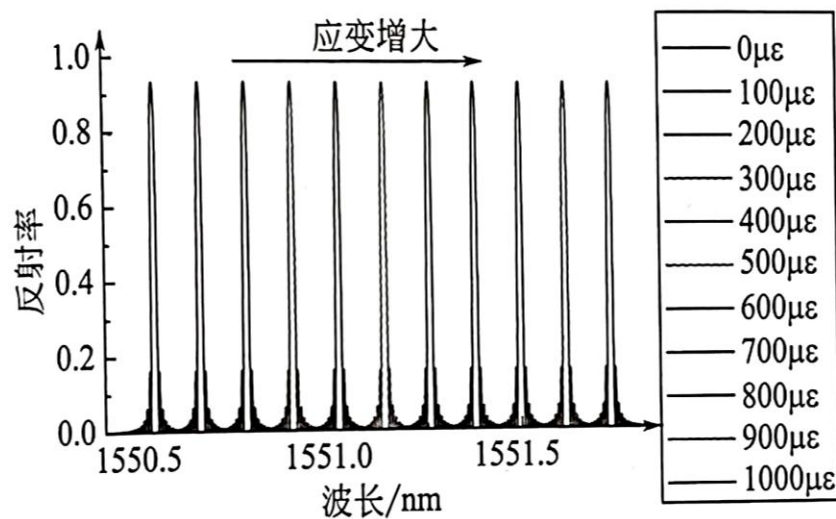
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = S_\varepsilon \varepsilon_z = \left\{ 1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \varepsilon_z$$

以熔融石英为例： $p_{11} = 0.121, p_{12} = 0.270, \nu = 0.170, n_{eff} = 1.456$

得： $S_\varepsilon = 0.784$

当波长 $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$ ，单位微应变引起的光纤光栅反射中心波长 λ_B 变化为 $1.22 \text{ pm}/\mu\varepsilon$

应变传感特性仿真如下，随着应变量的增加，光纤光栅反射光谱向长波长方向移动，且具有良好的线性关系。



光纤光栅应变传感仿真结果

➤ 温度传感

假设条件：

- 1) 研究光纤的热效应，忽略由外包层和被测场的热效应引起的其他物理过程；
- 2) 石英光纤的软化点在2000°C以上，一般的测温范围内忽略对热膨胀系数的影响；
- 3) 在工作波长范围内，热光效应的作用保持一致；
- 4) 一般光纤光栅的尺寸为10~20mm，忽略光栅不同位置的温差产生的热应力。

当温度发生变化时，热胀效应使得光纤光栅伸长或缩短而改变其光栅常数，导致光栅周期 Λ 变化；且由于热光效应使得光栅区域的有效折射率 n_{eff} 变化。

➤ 温度传感

$$\Delta\lambda_B = 2 \cdot \Delta n_{eff} \cdot \Lambda + 2 \cdot n_{eff} \cdot \Delta\Lambda$$

基于以上假设，建立光纤光栅传感器的温度传感模型。
将上式两边分别除以 ΔT ，整理得

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \left(\Lambda \frac{\Delta n_{eff}}{\Delta T} + n_{eff} \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T} \right)$$

热光效应引起光纤纤芯有效折射率 n_{eff} 的变化为：

$$\Delta n_{eff} = \xi \cdot \Delta T \cdot n_{eff}$$

ξ 为光纤材料的热光系数，表示折射率随温度的变化率



光纤材料的热膨胀效应会引起光栅周期 Λ 的变化：

$$\Delta\Lambda = \alpha \cdot \Delta T \cdot \Lambda$$

α 为光纤材料的热膨胀系数，它表示光栅周期随温度的变化率。

则

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \cdot \Lambda \cdot \xi \cdot n_{eff} + 2 \cdot n_{eff} \cdot \alpha \cdot \Lambda$$

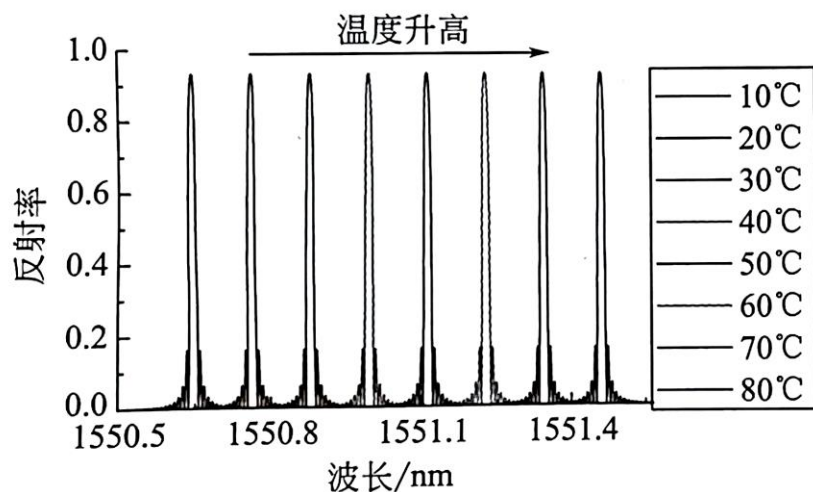
把Bragg波长偏移量写成相对偏移量的形式，将上式与 $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ 联立，得

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

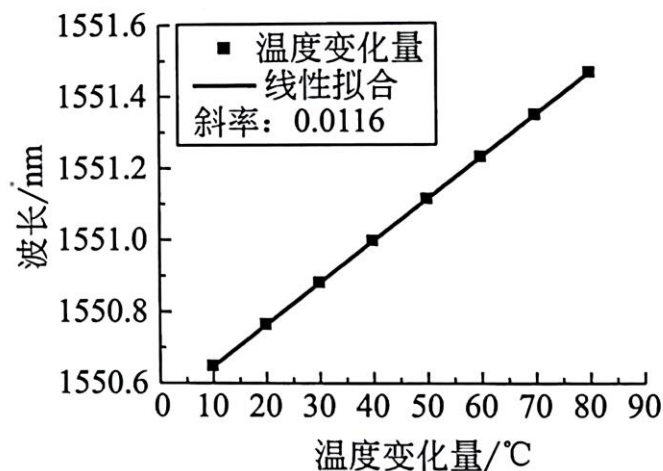
以某型传感器为例 $\alpha=0.5\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $\xi=7.0\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

当波长 $\lambda_B=1550\text{nm}$

单位温度变换引起的光纤光栅反射中心波长 λ_B 变化为 $11.6\text{pm}/^{\circ}\text{C}$



(a)不同温度变化量时光纤光栅反射谱



(b)光纤光栅反射中心波长与温度变化量的关系仿真结果

光纤光栅温度传感器仿真结果



➤ 应变和温度交叉敏感问题

光栅波长对应变和温度均敏感，从单个波长的变化量难以分辨出应变和温度各自的变化量，存在交叉敏感问题

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P)\varepsilon_z + (\xi + \alpha)\Delta T$$

其中
$$P = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$$

ε_z — 轴向应变

ξ — 光纤材料的热光系数

α — 光纤材料的热膨胀系数

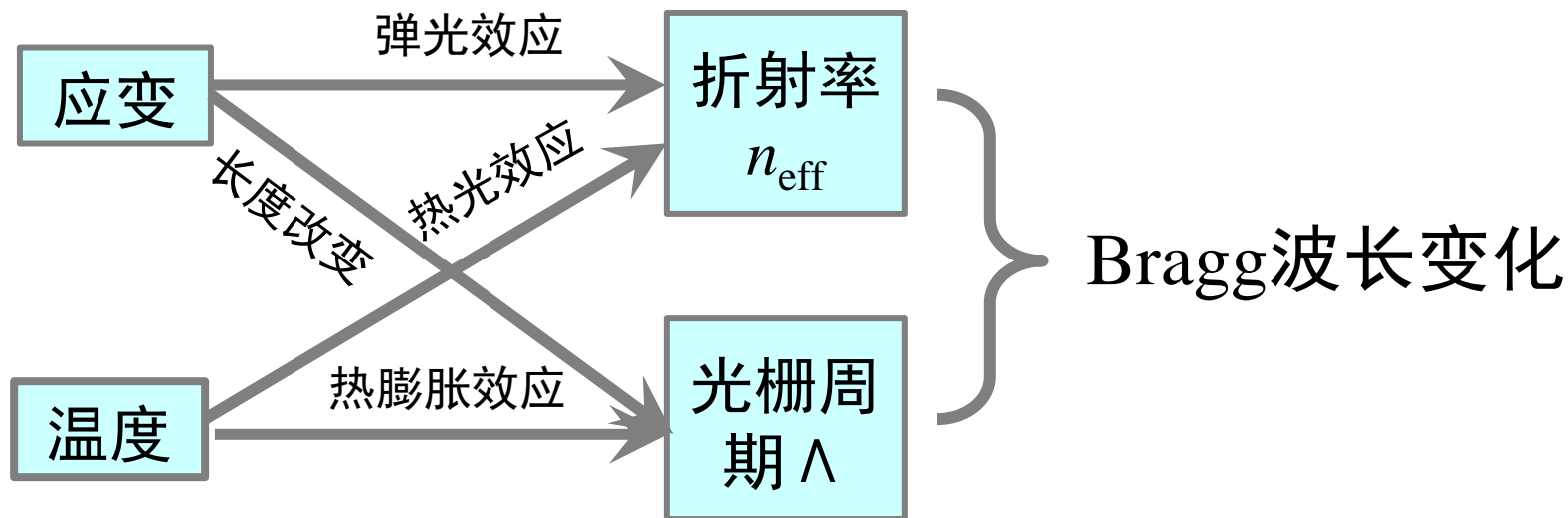
n_{eff} — 有效折射率

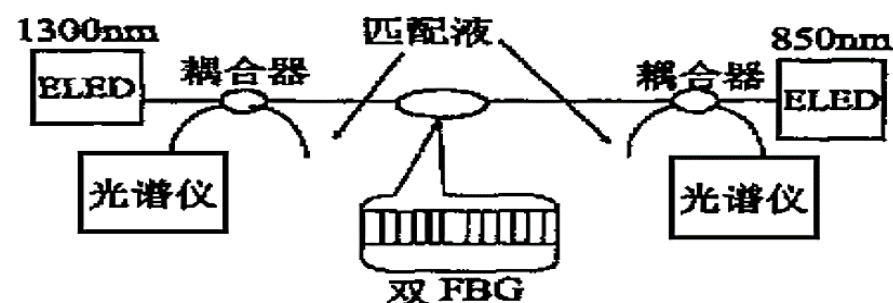
p_{11}, p_{12} — 有效折射率

ν — 应变-光学系数，为泊松比

➤ 应变和温度交叉敏感问题

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P)\varepsilon_z + (\xi + \alpha)\Delta T$$





方案1：双波长矩阵运算法

在一个传感头中获得两个不同的Bragg波长 λ_1 和 λ_2 同时对温度和应变敏感，且二者相差较大时，通过检测这两个布拉格波长的位移实现应变及温度的同时测量。

当波长漂移随温度和应变的变化为线性时，则有矩阵方程：

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1\varepsilon} & K_{1T} \\ K_{2\varepsilon} & K_{2T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}$$

其中，系数矩阵 K 为常数，可通过实验测得。

二者波长相差较大， $\begin{vmatrix} K_{1\varepsilon} & K_{1T} \\ K_{2\varepsilon} & K_{2T} \end{vmatrix} \neq 0$ ，则

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{1\varepsilon} & K_{1T} \\ K_{2\varepsilon} & K_{2T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}$$

方案2：双参量矩阵运算法

除了Bragg波长外，还需要利用另一个对应变、温度同时敏感并成线性关系的物理量（如功率、频率等），以实现温度不敏感测量或温度和应变同时测量。

设该物理量为 ν ，当温度和应变同时变化时，该物理量和Bragg波长的变化为

$$\begin{bmatrix} \Delta \nu \\ \Delta \lambda_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\nu T} & K_{\nu \varepsilon} \\ K_{\lambda T} & K_{\lambda \varepsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \varepsilon \end{bmatrix}$$

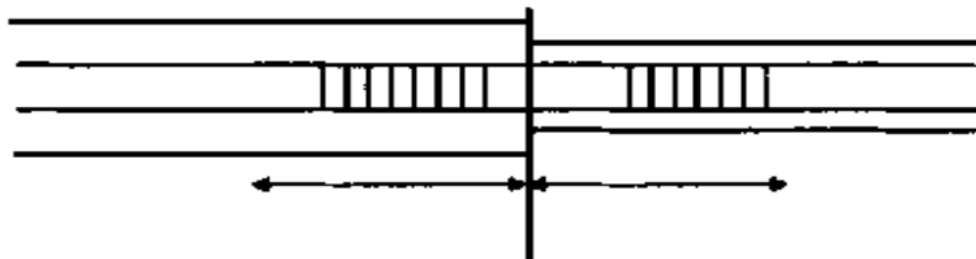
$K_{\nu T}$ 、 $K_{\nu \varepsilon}$ —物理量 ν 的温度和应变灵敏度系数

$K_{\lambda T}$ 、 $K_{\lambda \varepsilon}$ —Bragg波长的温度和应变灵敏度

方案3：应变（温度）补偿法

对传感单元进行特殊设计，使其某相对物理量对温度(应变)不敏感，以达到温度(应变)的测量或两个量同时测量的目的。

可采用两个不同包层直径的光纤光栅传感器（FBG）作为传感单元，结果如图所示。

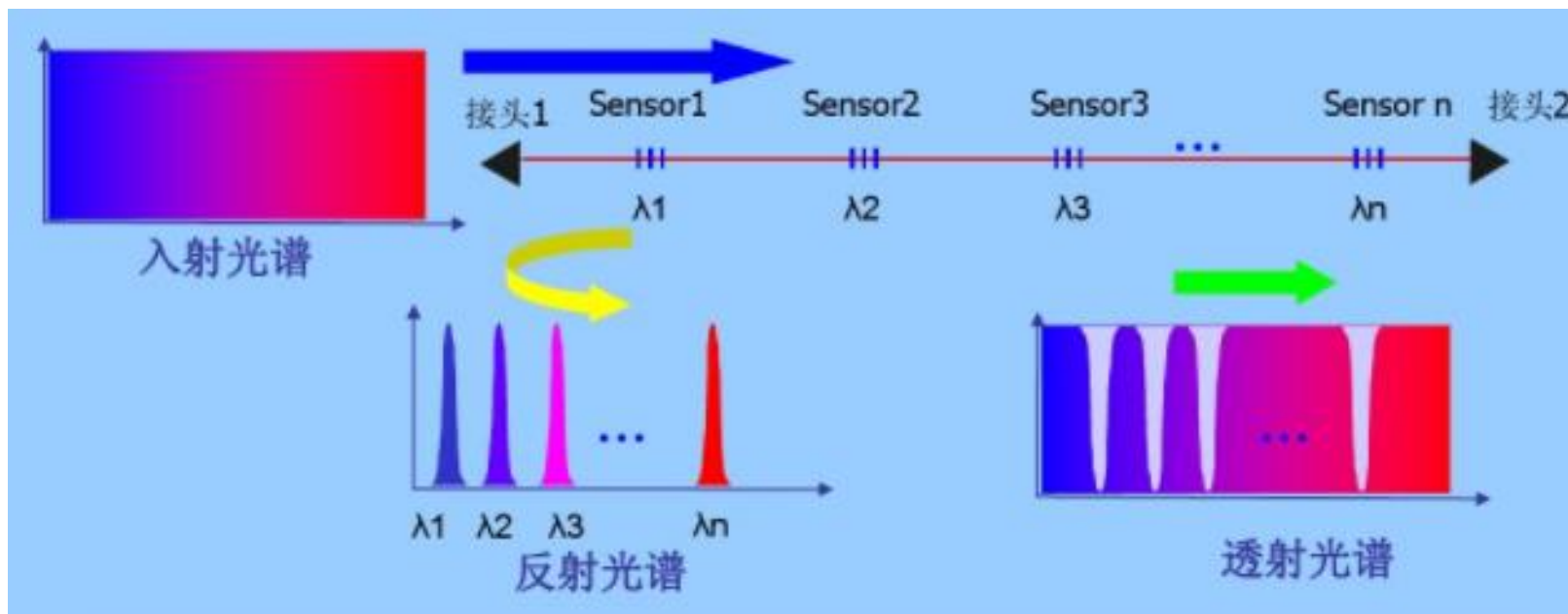


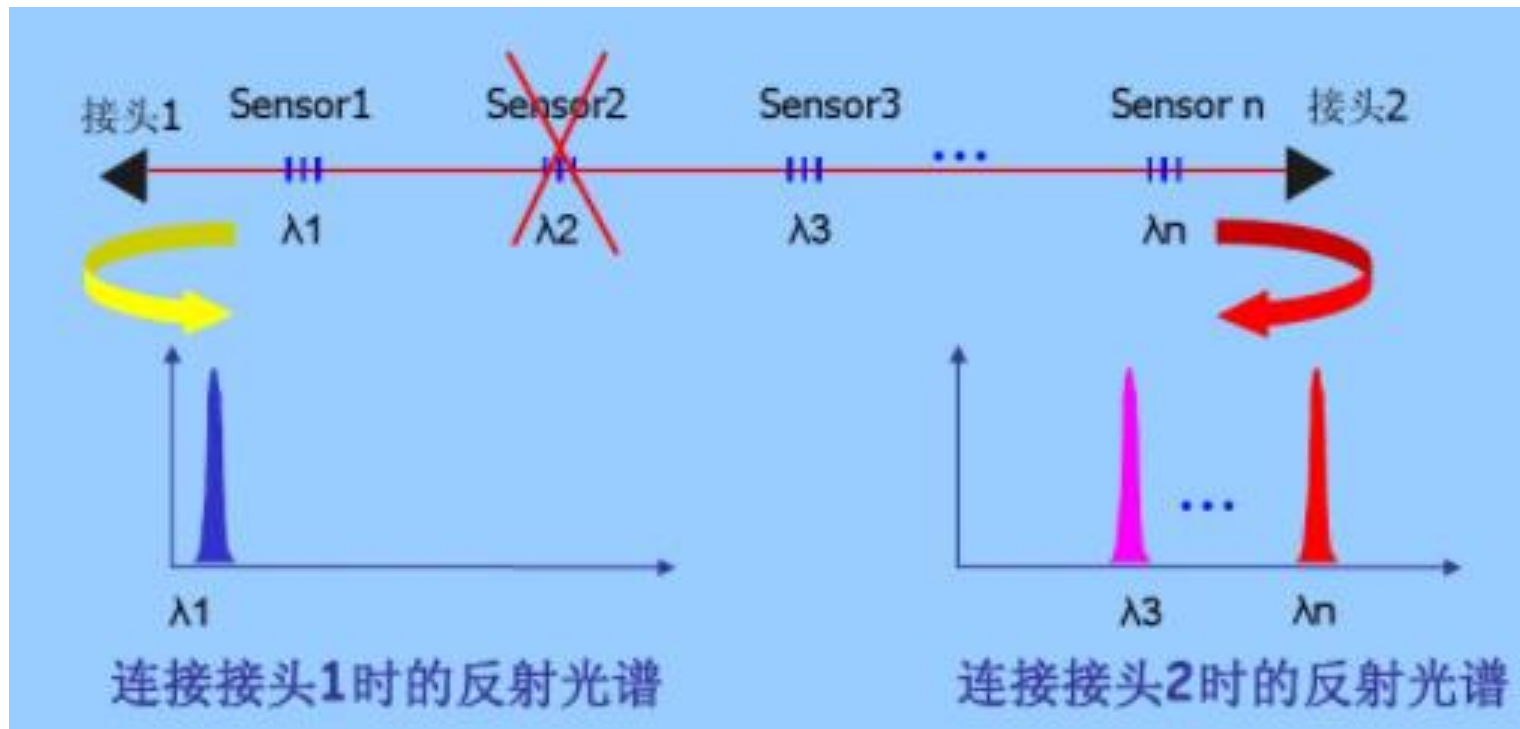
这两个FBG对温度灵敏度基本相同，对应变则一大一小，相差较大，因此，先通过测两Bragg波长的相对偏移量，可知应变的变化。进而再考虑绝对偏移量，由测得的应变的变化，再依据Bragg波长与应变和温度的关系，可以得到温度值，从而实现两物理量的同时测量。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P)\varepsilon_z + (\xi + \alpha)\Delta T$$

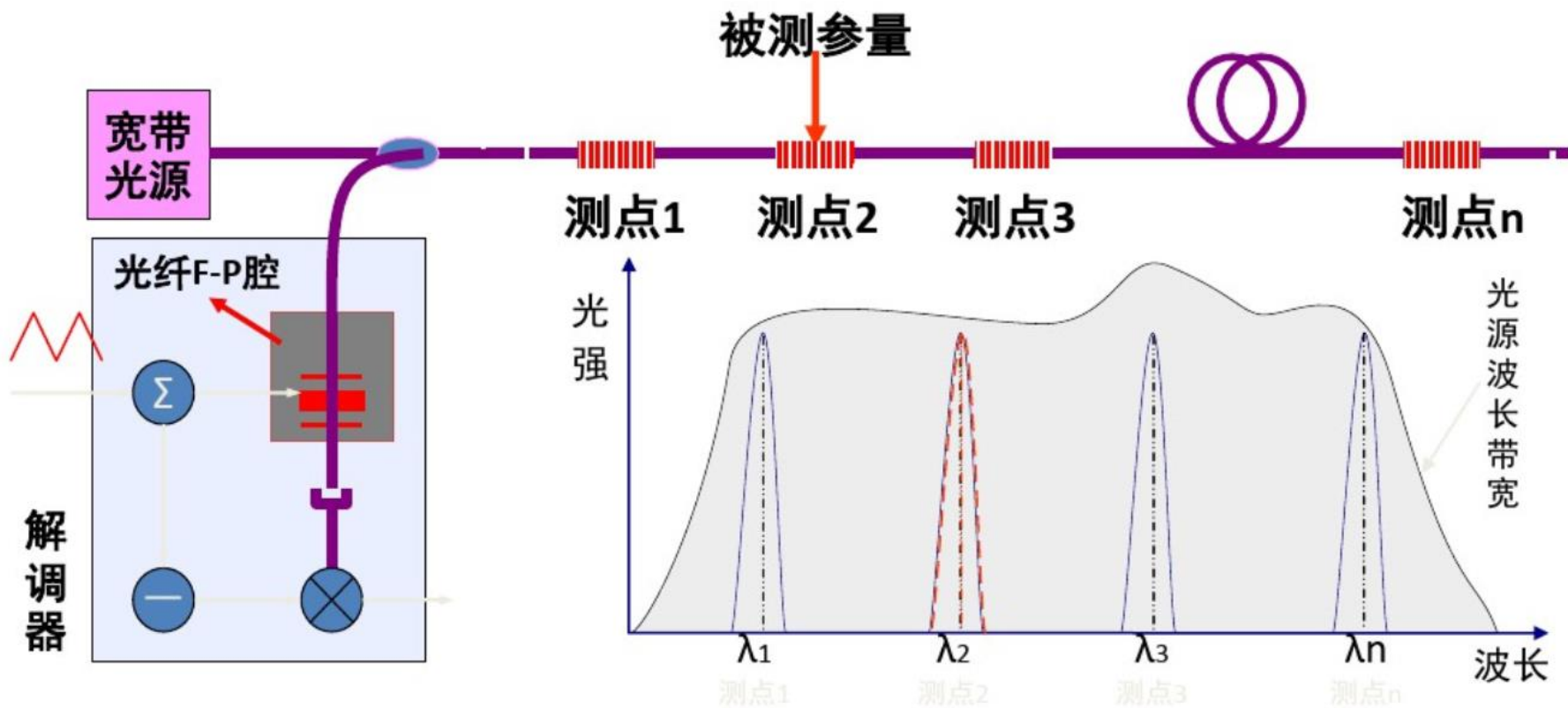
➤ 波分复用技术

- 采用波分复用技术，可实现一根光纤上串联多个传感器
- 通过对不同波长光栅进行特定封装，在一根光纤上可实现温度、应变等多参数实时测量





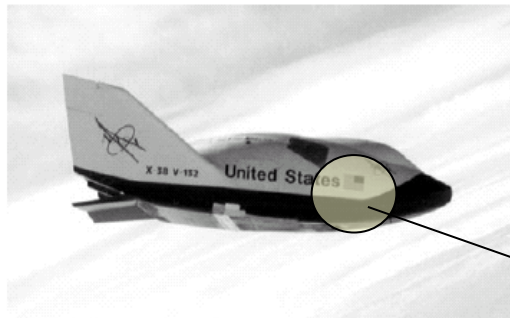
通过将两端光纤接头连接到监测仪器，即使某传感器故障，其它传感器依然可以被有效测量。



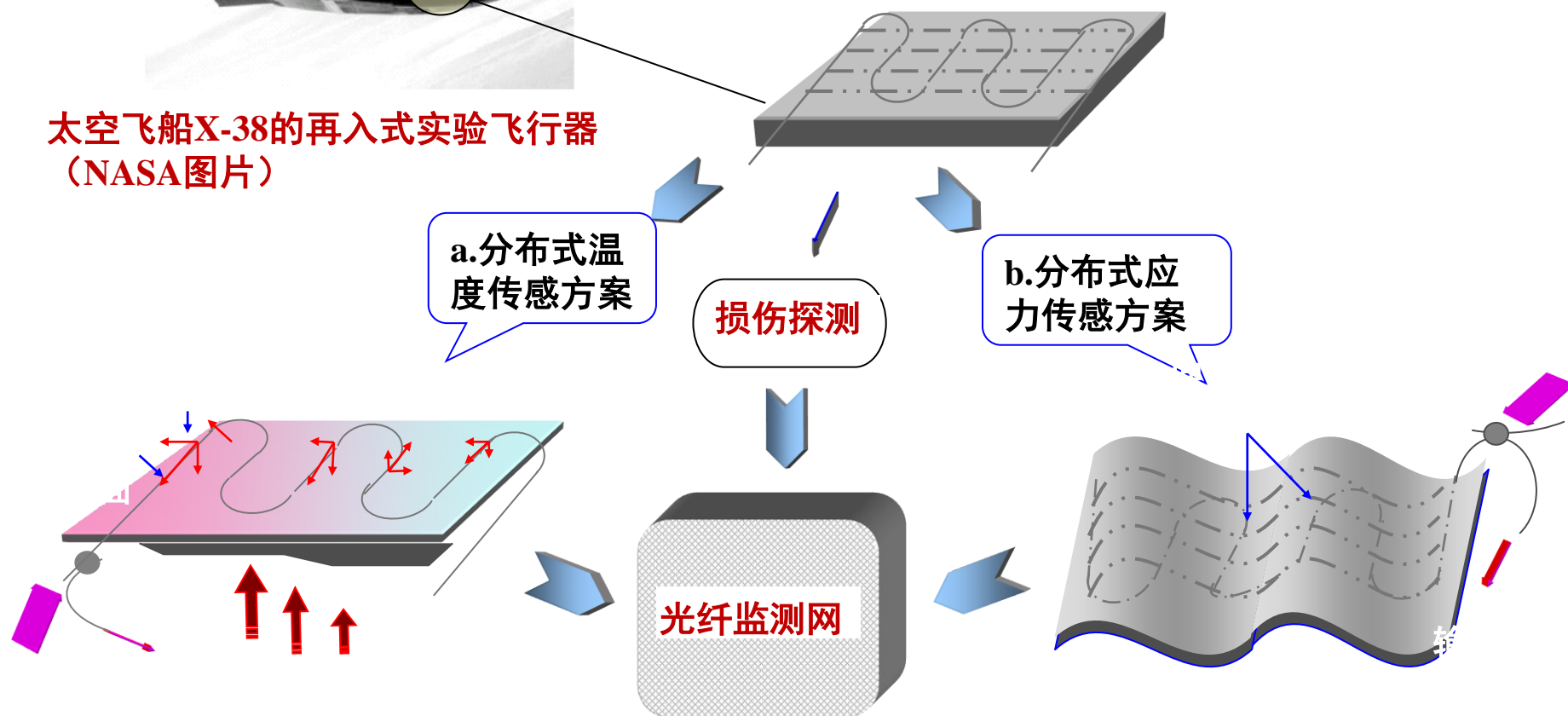
利用光纤光栅温度、应变敏感的特性，通过传感头的设计、封装，可以测量很多物理参数：

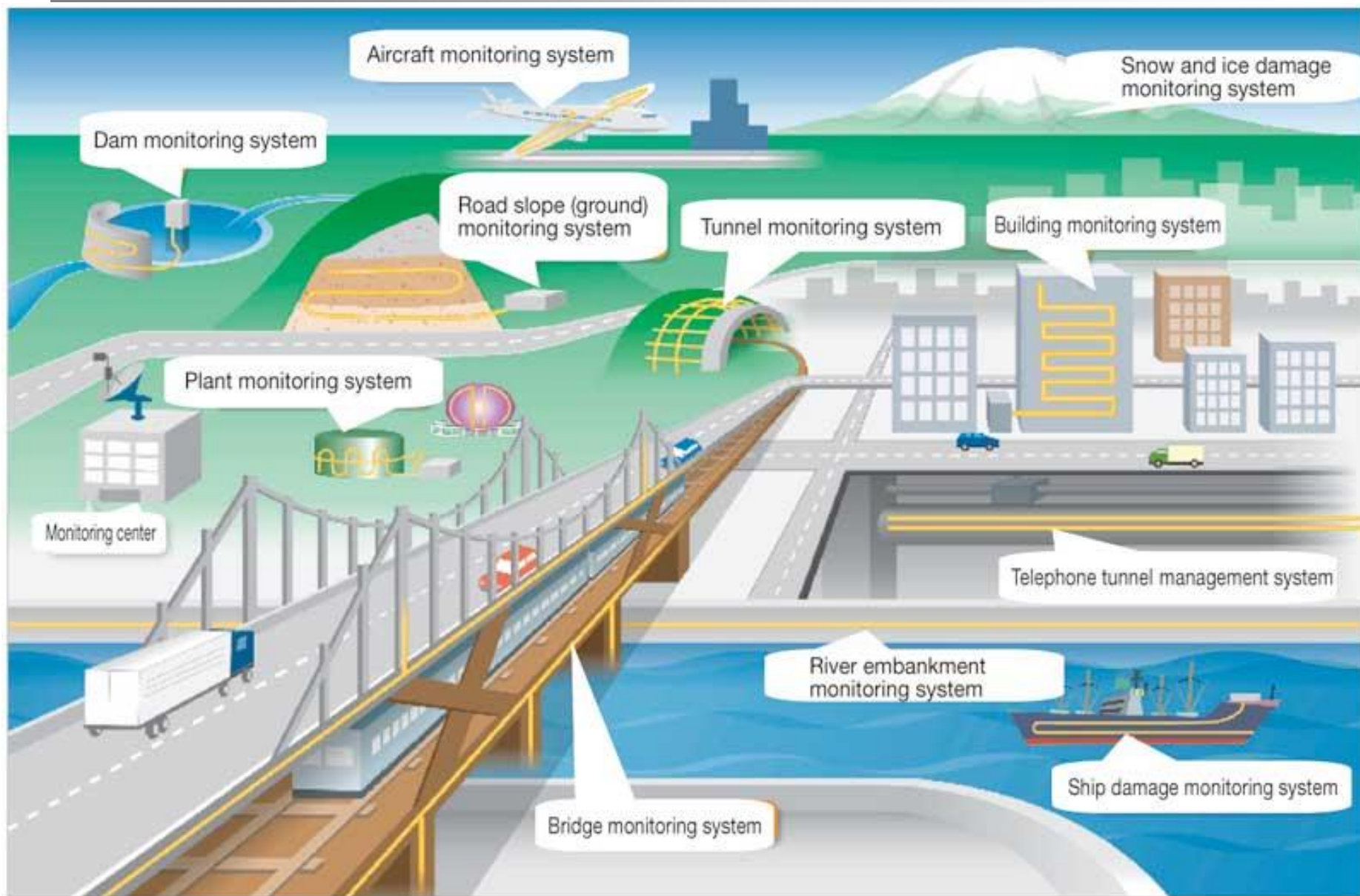
温度
应变
压力
位移
加速度
...





太空飞船X-38的再入式实验飞行器
(NASA图片)







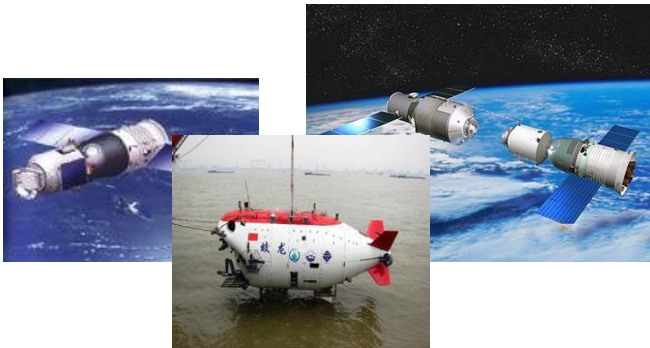
本节小结:

1. 光导纤维的导光原理
2. 光纤传感器的工作原理及特点
3. 分布式光纤传感器和光纤光栅传感器的应用
4. 光纤光栅传感器温度和应变交叉敏感问题

思考题：

1. 你认为采用光纤光栅传感器监测山体滑坡是否合理？说明理由。
 2. 分布式光纤传感器测管道泄漏的原理是什么？
 3. 复合材料加筋板冲击位置识别如何采用光纤光栅传感器来实现？
- 参考三篇文献。





Thanks

