



传感器与检测技术

— 光纤传感器

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及其宝贵的特点。

华中科技大学自动化学院

光纤式传感器应用

- 电绝缘：特别适合于高压供电系统及大容量电机的测试。
- 抗电磁干扰：特别适合于高压大电流、强磁场噪声、强辐射等场合。
- 光纤的传输损耗小，容易实现对被测信号的远距离监控。
- 高灵敏度；
- 非侵入性；

斯奈尔定理

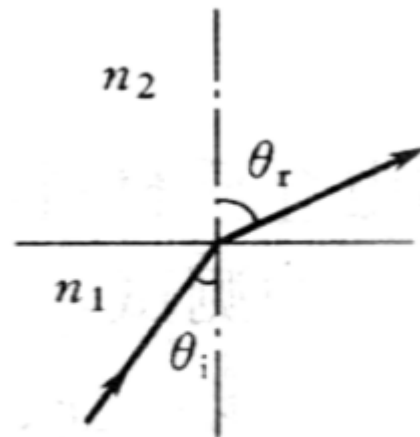
斯乃尔定理指出：当光由光密物质（折射率大）射出至光疏物质（折射率小）时，发生折射如下图（a）所示，其折射角大于入射角，即 $n_1 > n_2$ 时， $\theta_r > \theta_i$ 。 n_1 、 n_2 、 θ_r 、 θ_i 之间的数学关系为

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

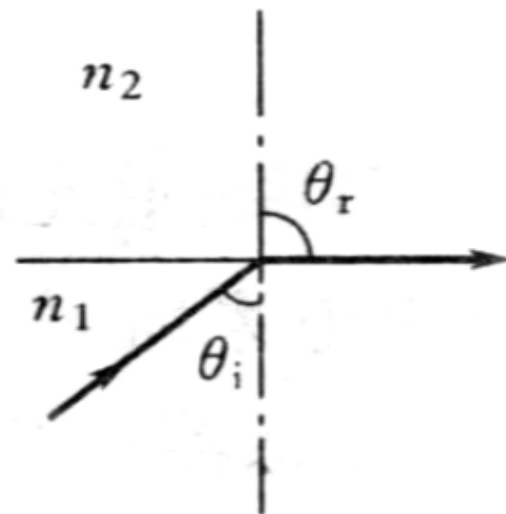
入射角 θ_i 增大时，折射角 θ_r 也随之增大，且始终 $\theta_r > \theta_i$ 。当 $\theta_r = 90^\circ$ 时， θ_i 仍小于 90° ，此时，出射光线沿界面传播，如图（b）所示，称为临界状态。这时有 $\sin \theta_r = \sin 90^\circ = 1$

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

$$\theta_{i_0} = \arcsin(n_2 / n_1)$$



(a)

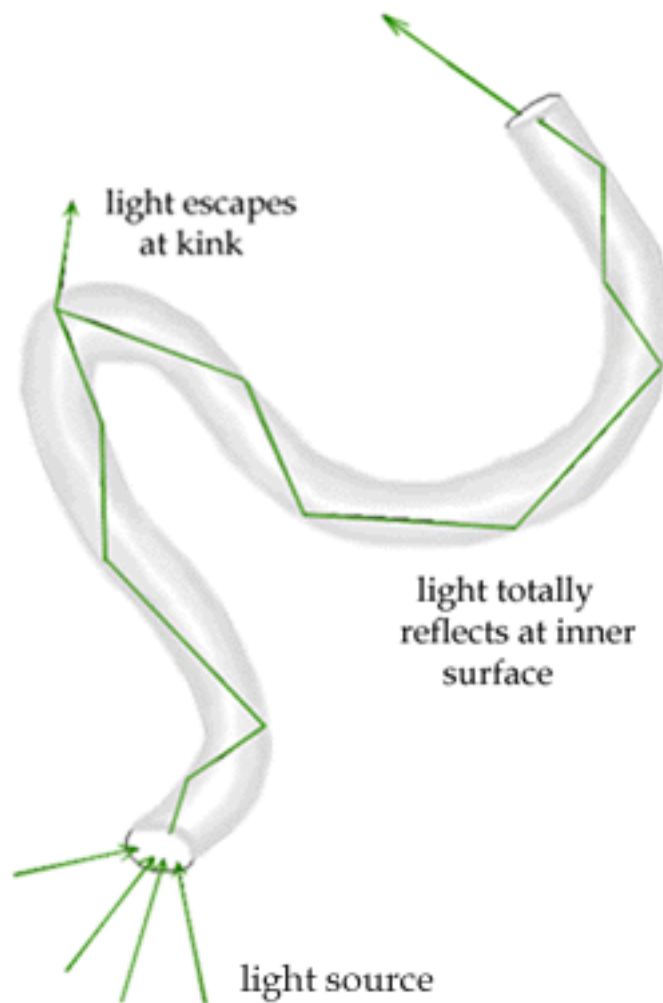
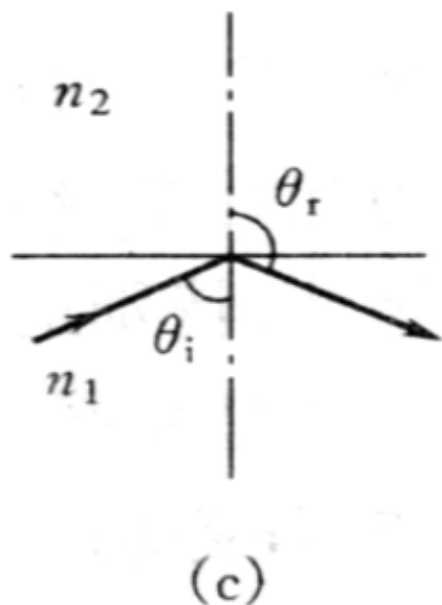


(b)

斯奈尔定理

当光由光密物质（折射率大）出射至光疏物质（折射率小）时，发生折射现象

当 $\theta_i > \theta_{i0}$ 时, $\theta_r > 90^\circ$ ，这时便发生全反射现象，如图（c）所示，其出射光不再折射而全部反射回来。



光纤结构

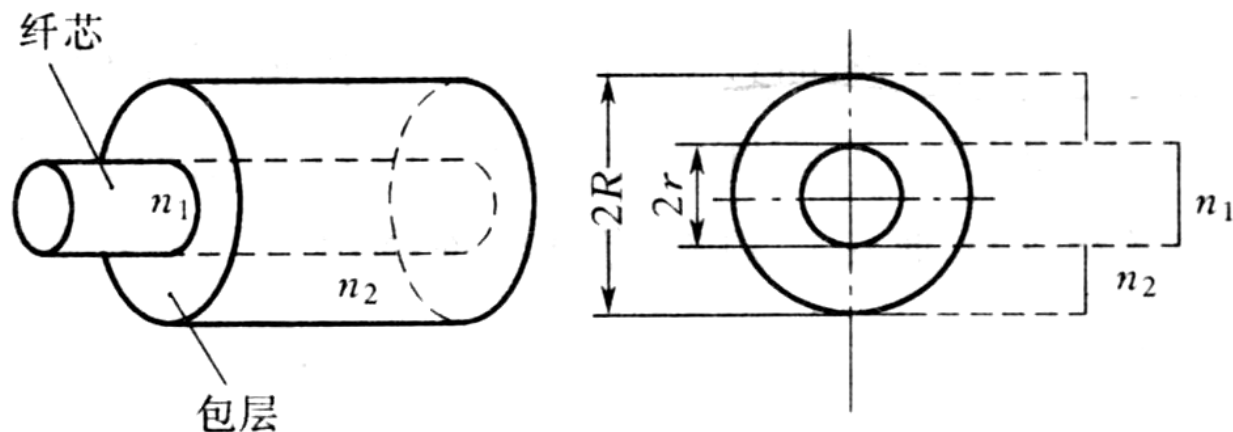
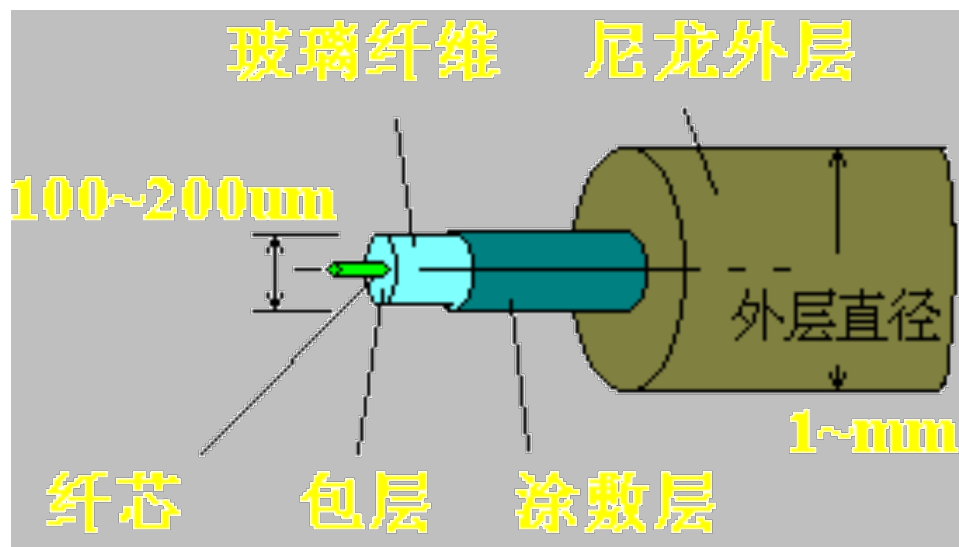
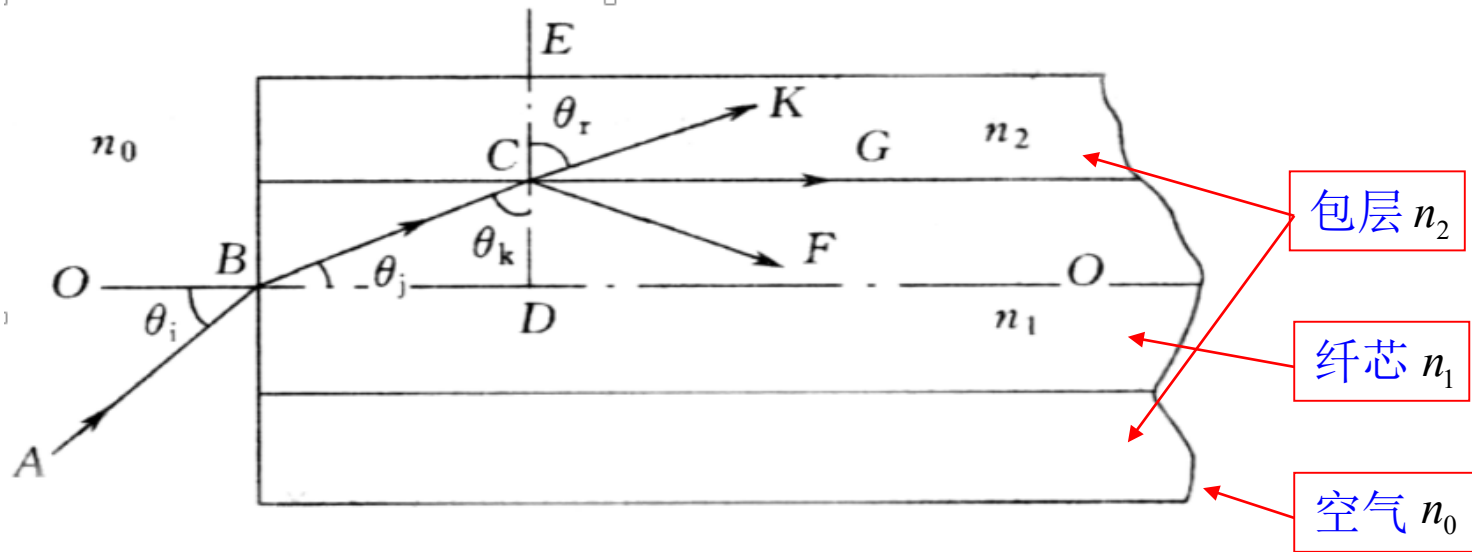


图 9-2 光纤结构

光纤呈圆柱形，它通常由玻璃纤维芯和玻璃包层两个同心圆柱的双层结构组成。



光纤的数值孔径NA



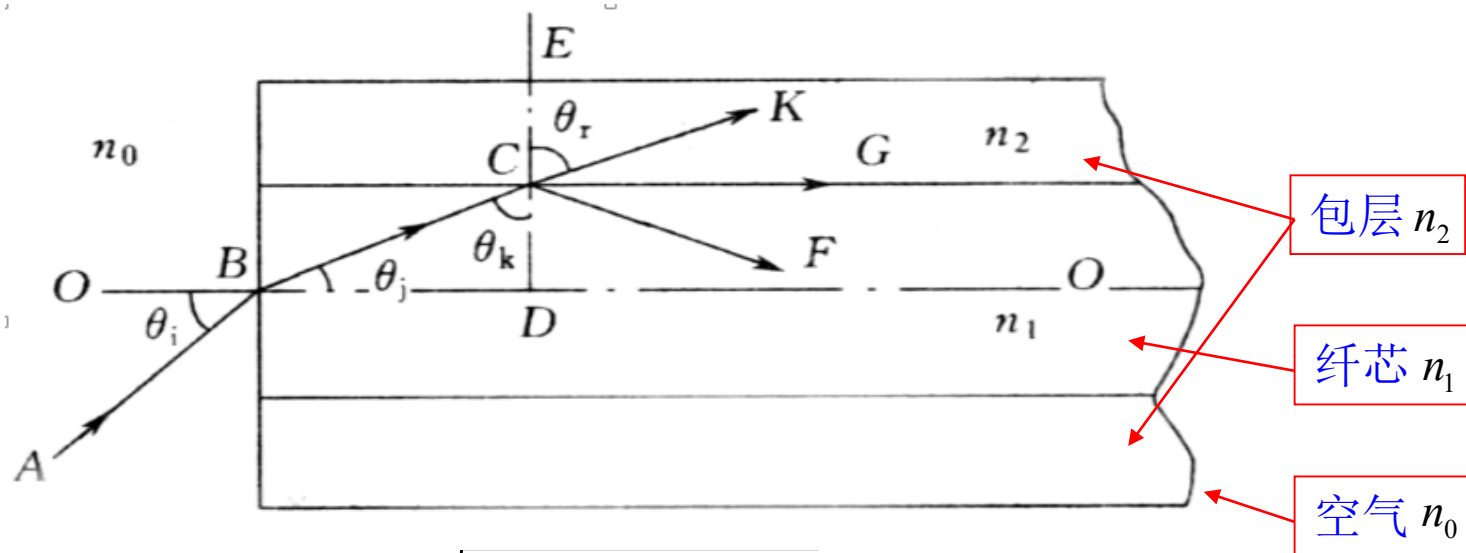
$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_j \quad \sin \theta_i = (n_1 / n_0) \sin \theta_j$$

$$n_1 \sin \theta_k = n_2 \sin \theta_r \quad \theta_j = 90^\circ - \theta_k$$

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

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

光纤的数值孔径NA



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

n_0 为入射光线 AB 所在空间的折射率，一般皆为空气，故 $n_0 \approx 1$ ；
 n_1 为纤芯折射率， n_2 为包层折射率。

当 $n_0=1$ 时

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

The diagram illustrates the internal structure of a fiber optic cable and the path of light rays. The cable consists of a central core (纤芯) with refractive index n_1 and an outer cladding (包层) with refractive index n_2 . The surrounding medium is air (空气) with refractive index n_0 . A light ray enters the cable at point B on the core-cladding interface. The incident ray AB makes an angle θ_i with the normal line EO. Inside the core, the ray travels along BC. At point C, where the ray hits the core-cladding interface, the angle of incidence is θ_k . Part of the ray is reflected back into the core along CK, and part is refracted into the cladding along CF. The angle between the normal line ED and the reflected ray CK is θ_r . The ray continues horizontally through the core as ray FG. Labels include n_0 for air, n_1 for the core, and n_2 for the cladding. Points A, B, C, D, E, F, G, K, and O are marked on the diagram.

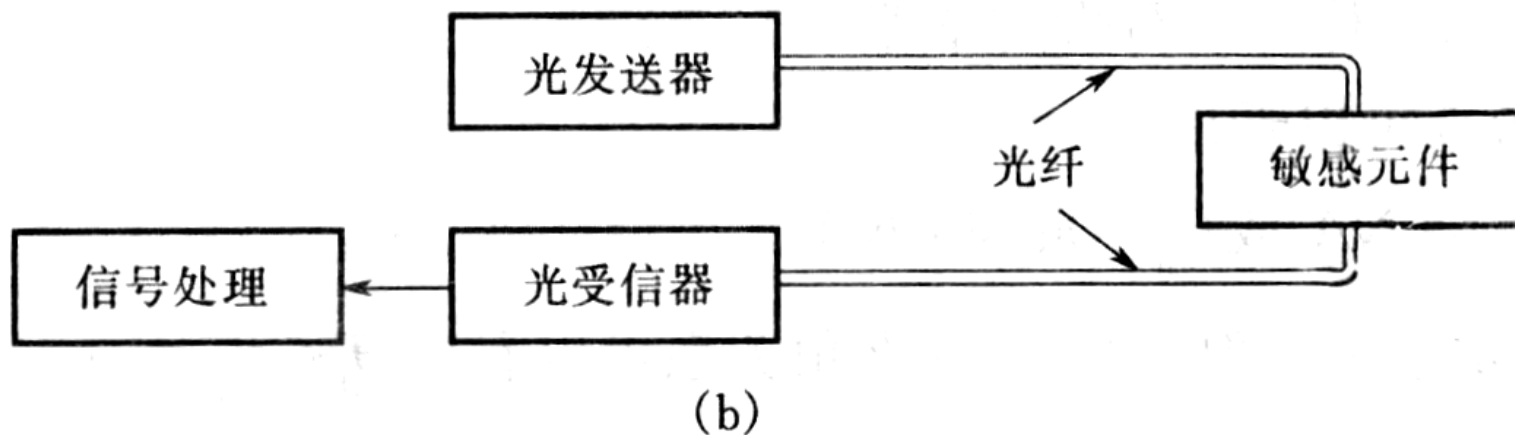
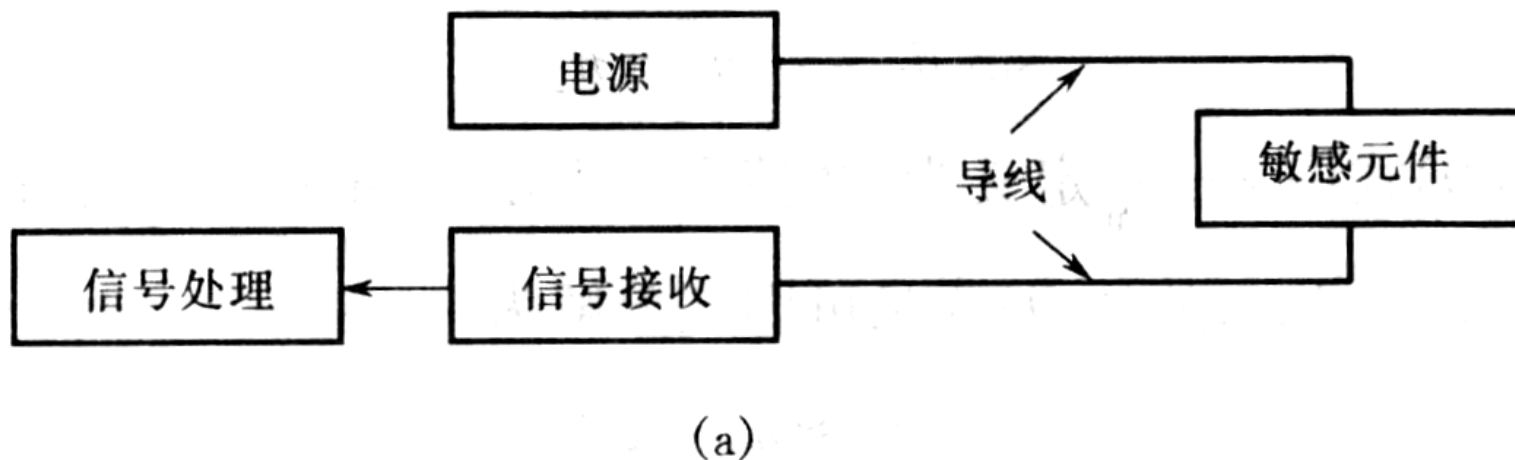
$$\text{当}\theta_r=90^\circ\text{ 的临界状态时, } \theta_i = \theta_{i0} \quad \sin \theta_{i0} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

纤维光学中把上式中的 $\sin\theta_{i0}$ 定义为“数值孔径” NA 。由于 n_1 和 n_2 相差较小，即 $n_1+n_2\approx 2n_1$ ，故上式又可因式分解为 $\sin\theta_{i0} = n_1\sqrt{2\Delta}$

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$$
 称为相对折射率差。

$\arcsin NA$ 是一个临界角，凡入射角 $\theta_i > \arcsin NA$ 的那些光线进入光纤后都不能传播而在包层消失；相反，只有入射角 $\theta_i < \arcsin NA$ 的那些光线才可以进入光纤被全反射传播。

光纤式传感器



(a) 传统传感器

(b) 光纤传感器

光测量—电场变化的测量

对光的测量实际上是对电场变化的测量通常光的电场用矢量 \mathbf{E} 来表示

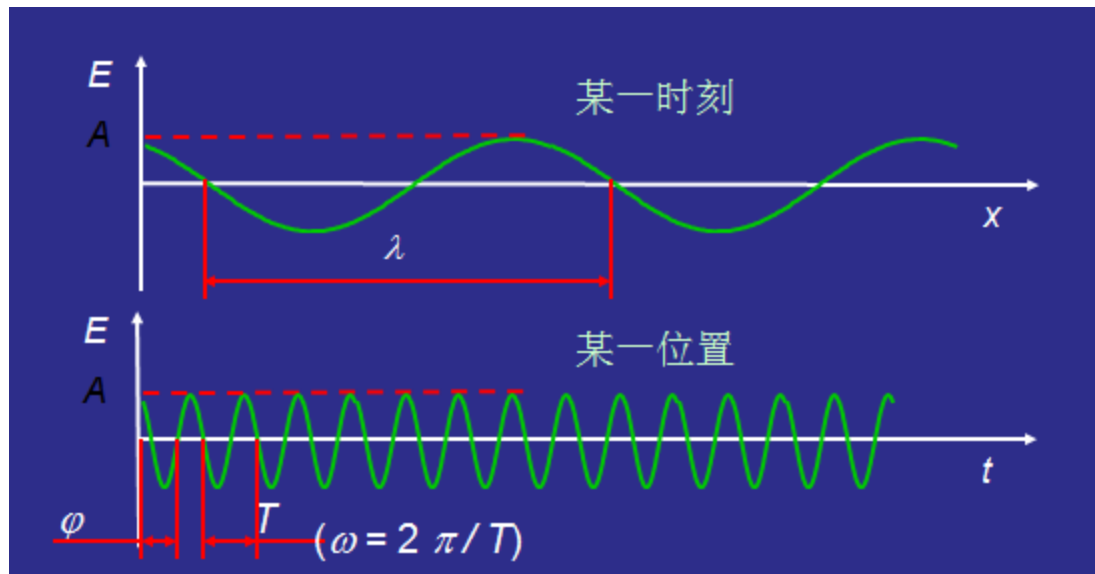
$$E = A \sin(\omega t + \varphi)$$

A ——电场 \mathbf{E} 的振幅矢量，包括光强度（矢量 \mathbf{A} 的大小）和偏振态(矢量 \mathbf{A} 的方向）

ω ——光波的振动频率

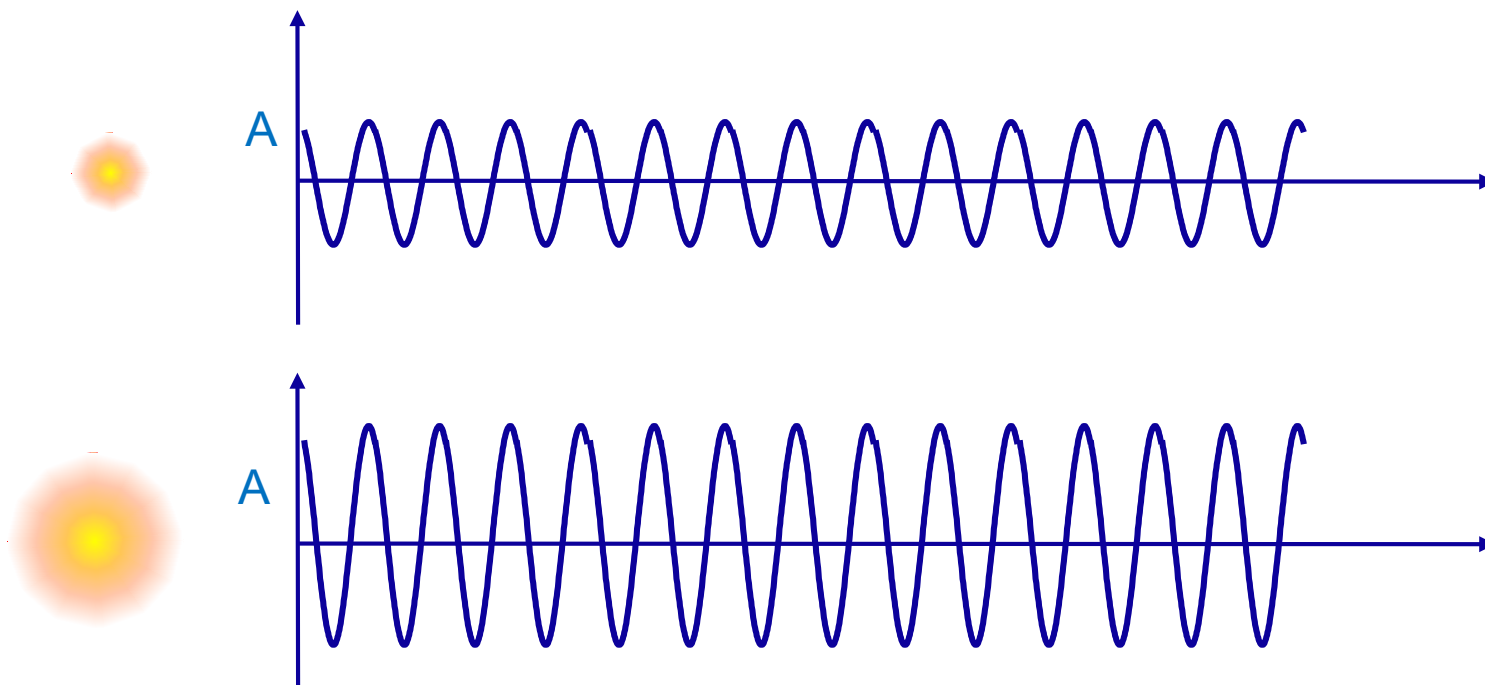
φ ——光的初相位

t ——光的传播时间



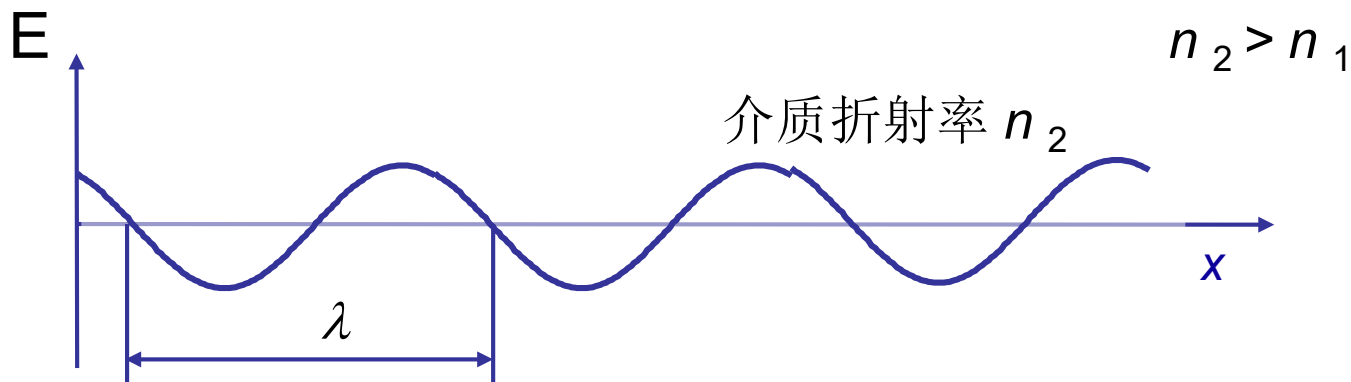
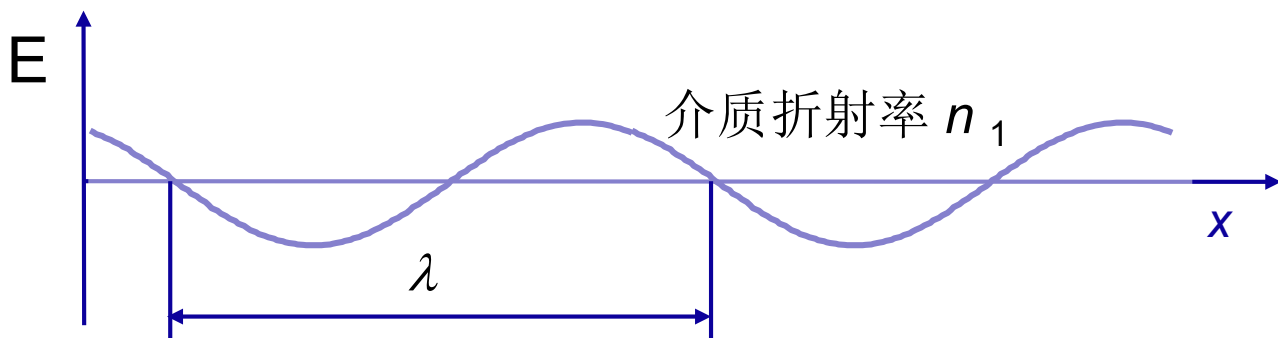
光的基本特性参量—— 振幅A

幅值A决定了光的强度，光强度的极值就是 A^2



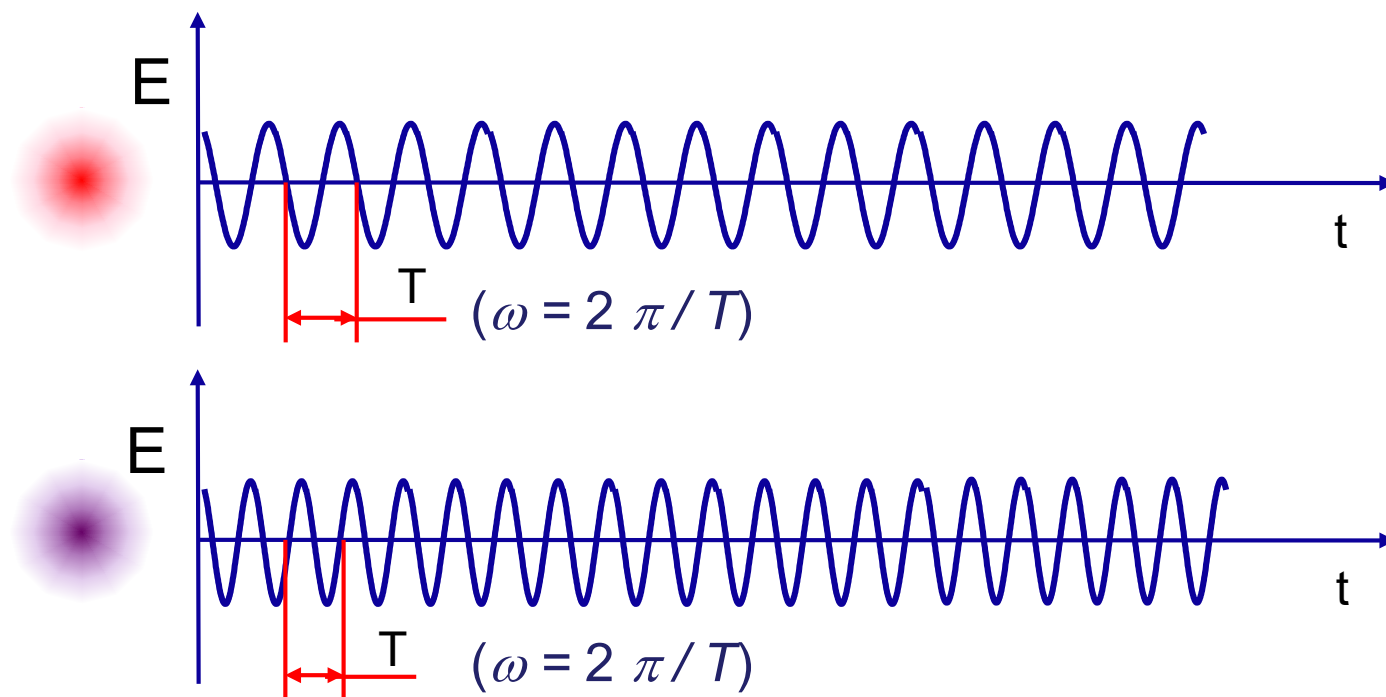
光的基本特性参量——波长 λ

在不同折射率的介质中光的波长是不相等的



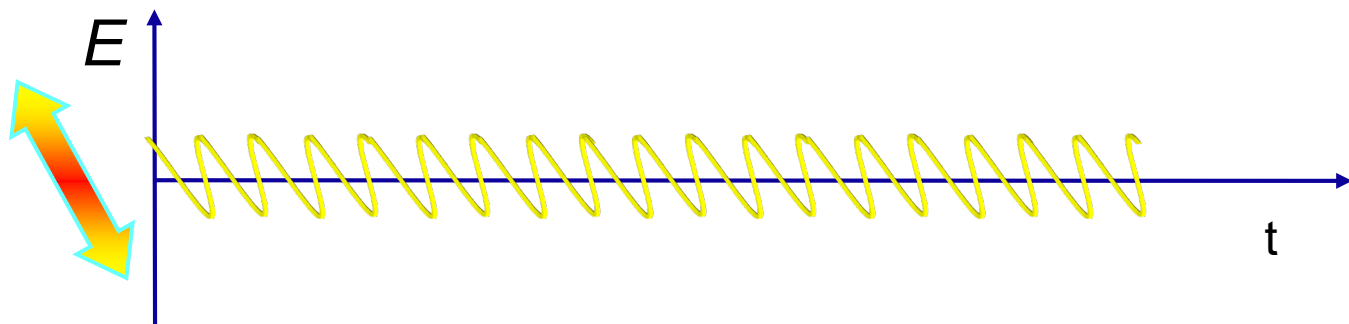
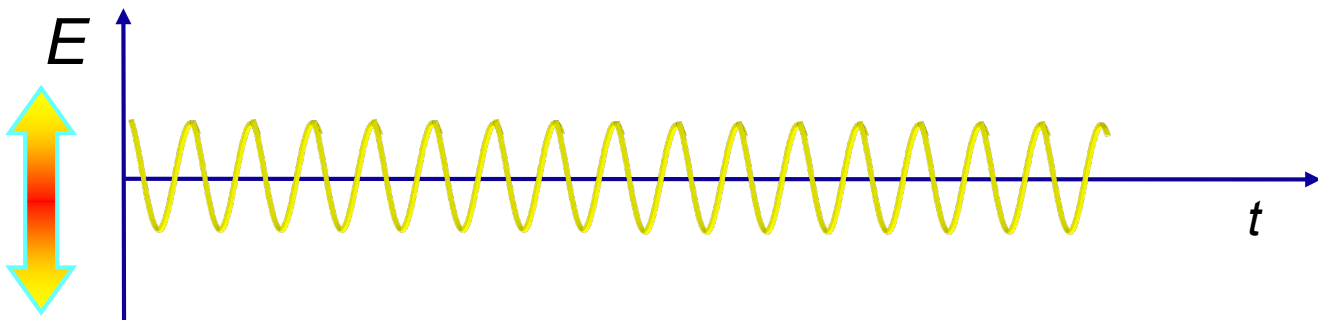
光的基本特性参量——频率 ω

光的频率表现为光的颜色，不随环境因素变化



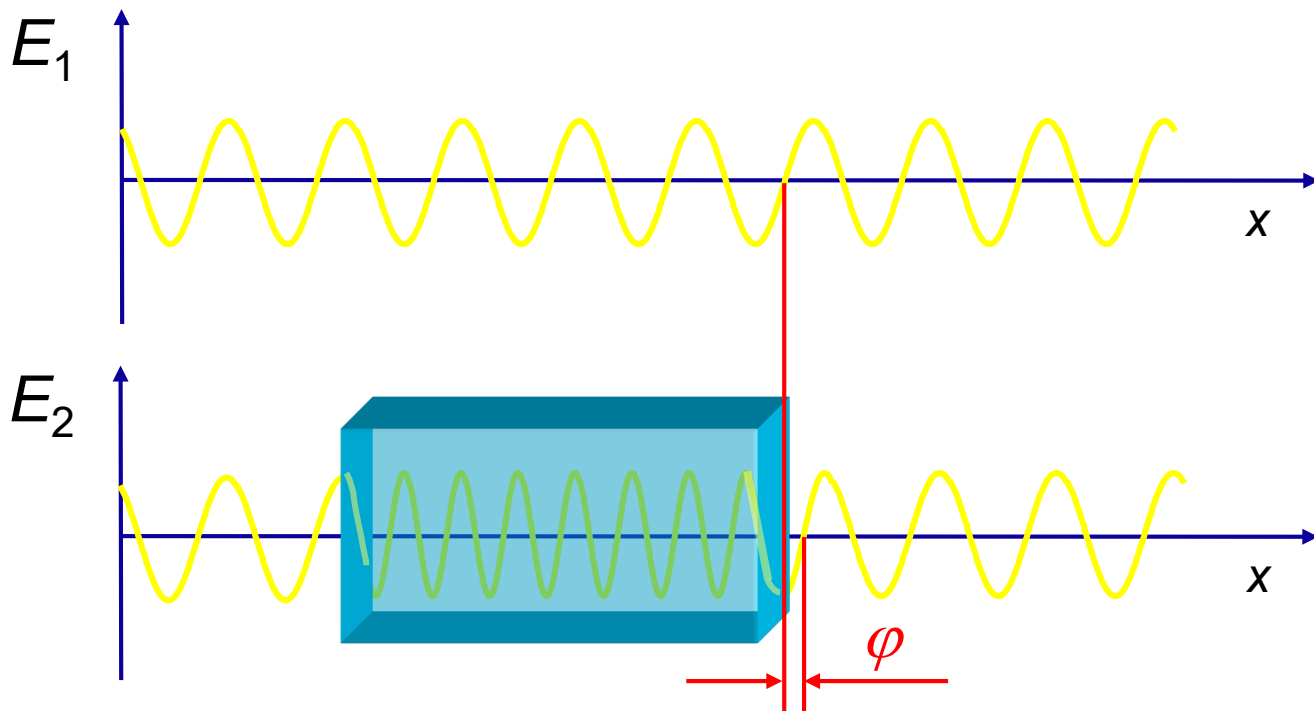
光的基本特性参量——振动方向

光振幅是一个矢量，其外部特性表现为偏振性



光的基本特性参量——初始相位 φ

反映了光波的光程



光纤传感器的基本结构

光的波动方程

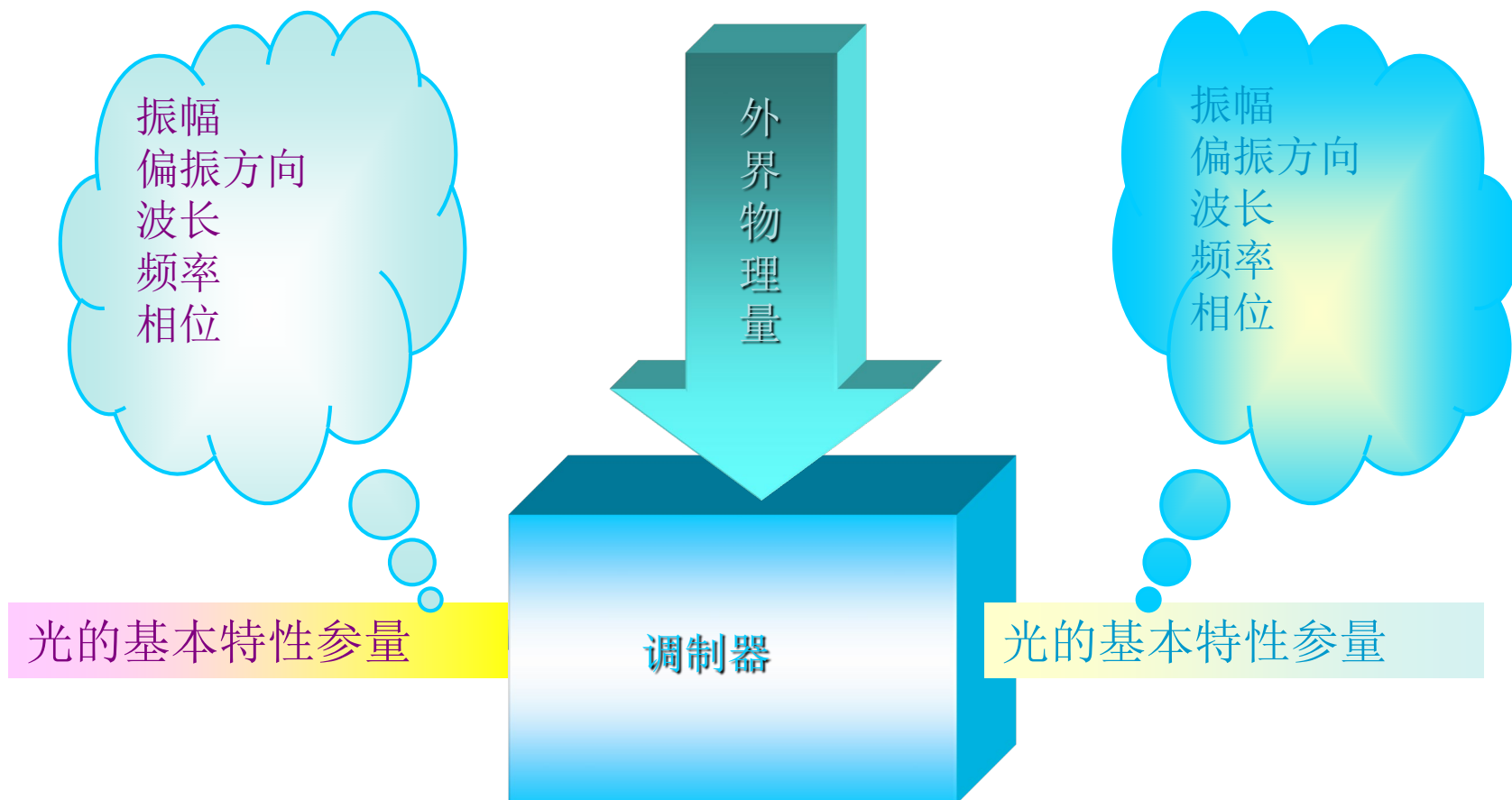


表 9-1 光纤传感器的原理及分类

传感器		光学现象	被 测 量	光 纤	分类
干涉型	相光 位纤 调传 制感 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	强光 度纤 调传 制感 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
		光纤漏泄模	液位	MM	b
	偏光 振纤 调传 制感 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
	频光 率纤 调传 制感 器	多普勒效应	速度、流速、振动、加速度	MM	c
		受激喇曼散射	气体浓度	MM	b
		光致发光	温度	MM	b

注: MM——多模光纤; SM——单模光纤; PM——偏振保持光纤。

a、b、c 为图 9-5 所示的三类光纤传感器。

根据光纤在传感器中的作用来分类



(a)



(b)



(c)

1. 功能型

2. 非功能型

3. 拾光型

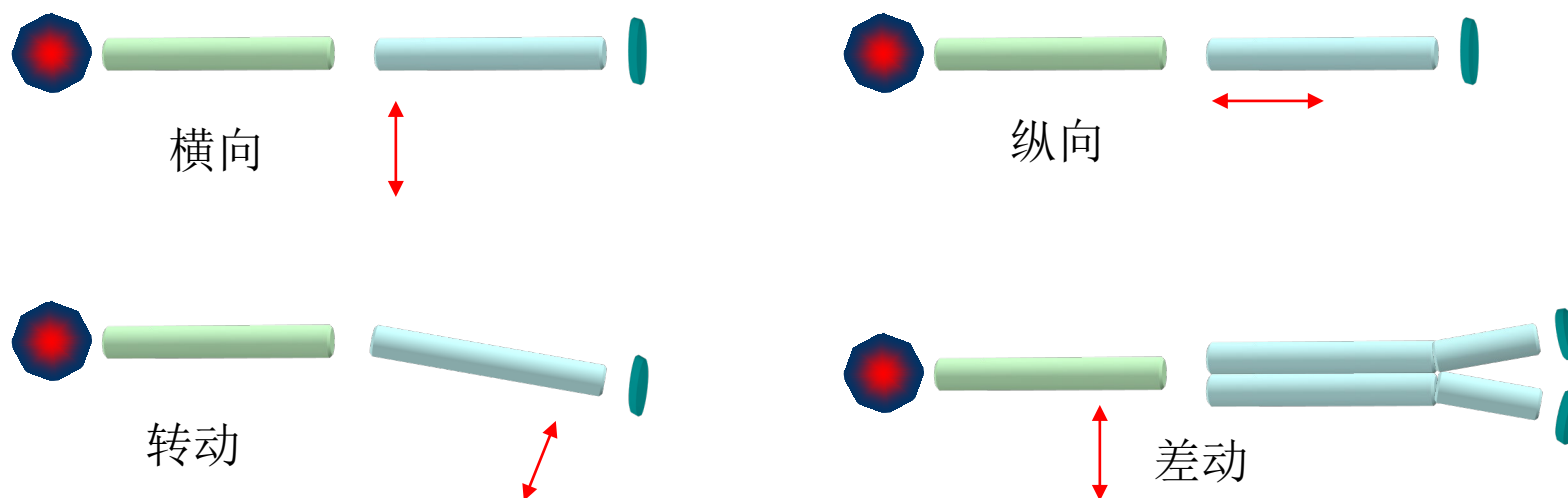
实用化的大都是非功能型的光纤传感器。

根据光受被测对象的调制形式-强度调制型

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变化来实现敏感测量。

$$E = \int \vec{A} \sin(kx - \omega t + \varphi)$$

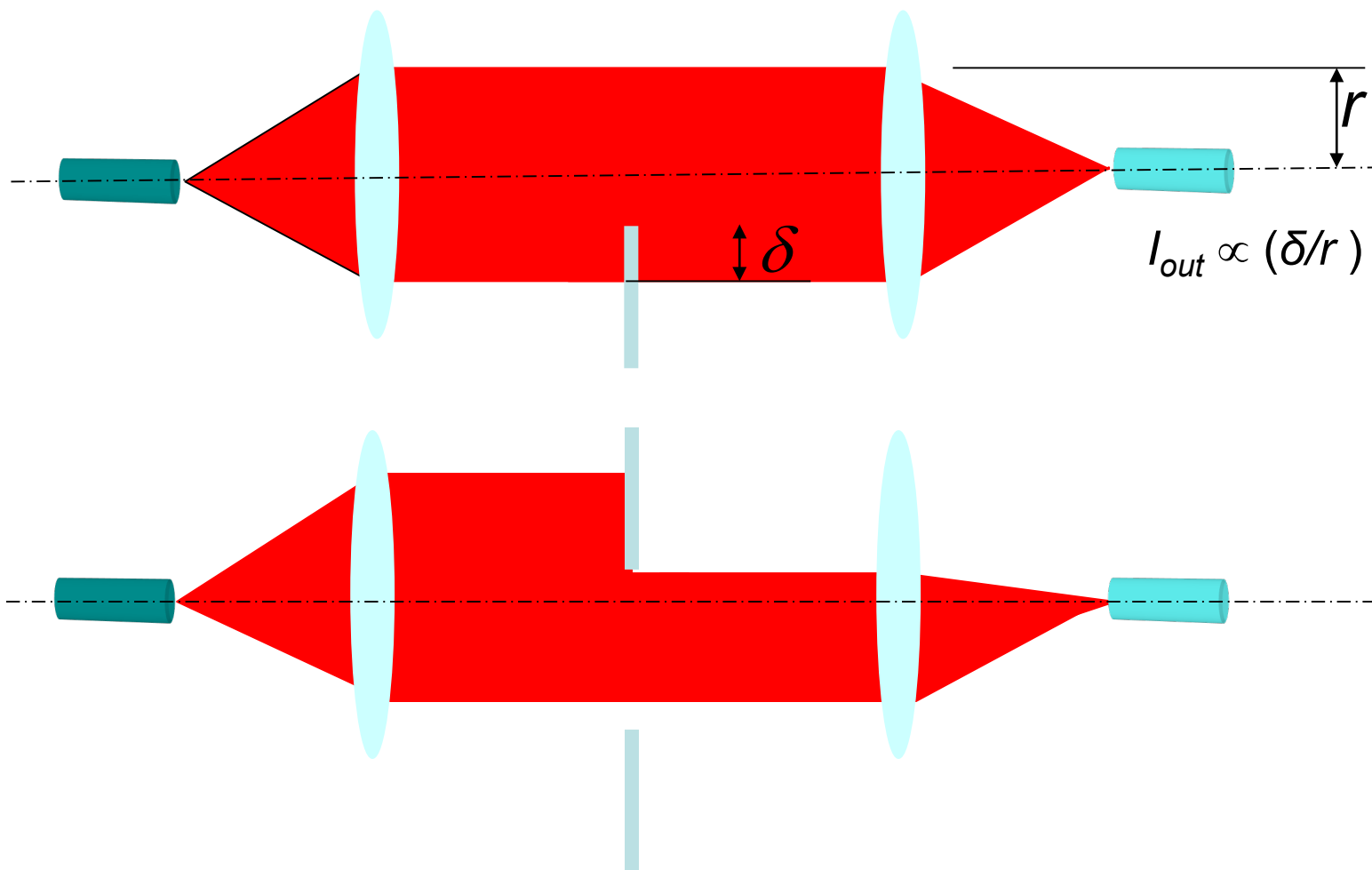
1)、透射式强度调制



光纤间距大约 $2\sim 3\mu\text{m}$ ，端面为平面；

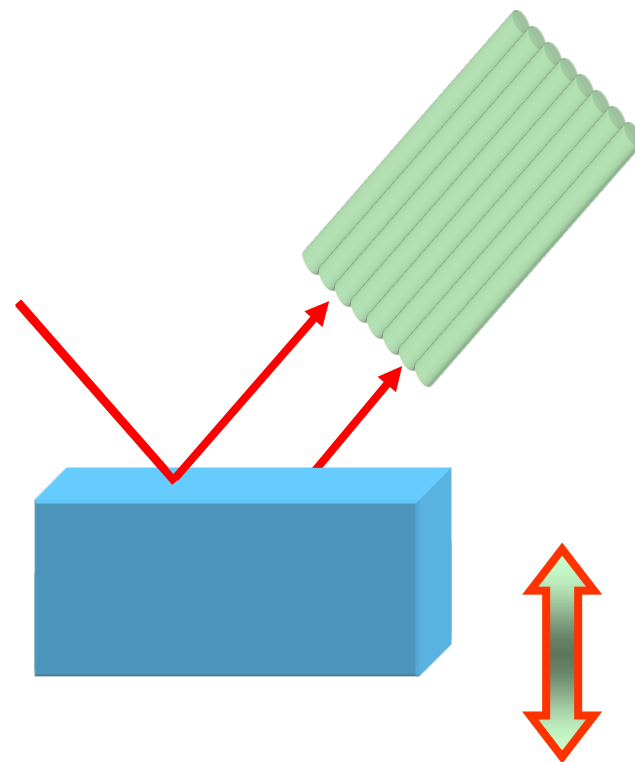
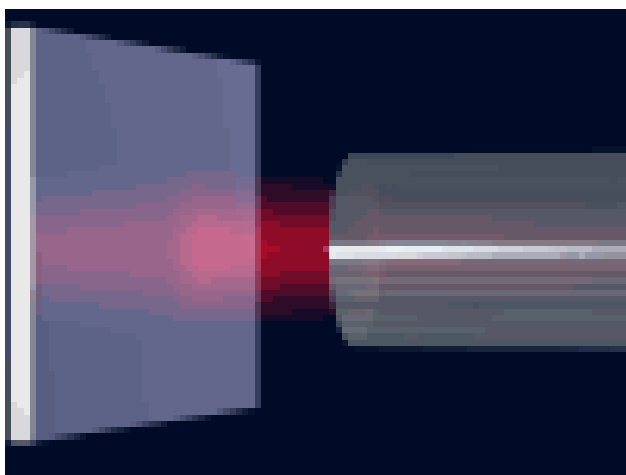
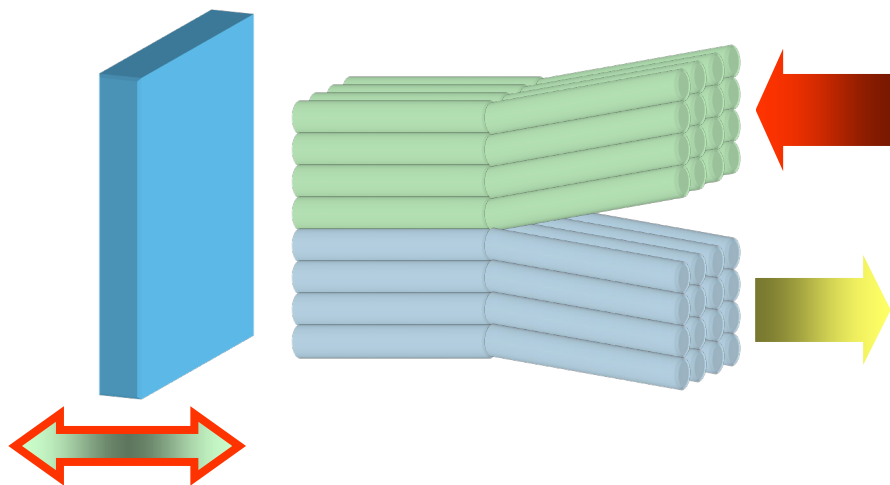
根据光受被测对象的调制形式-强度调制型

2)、开关式强度调制



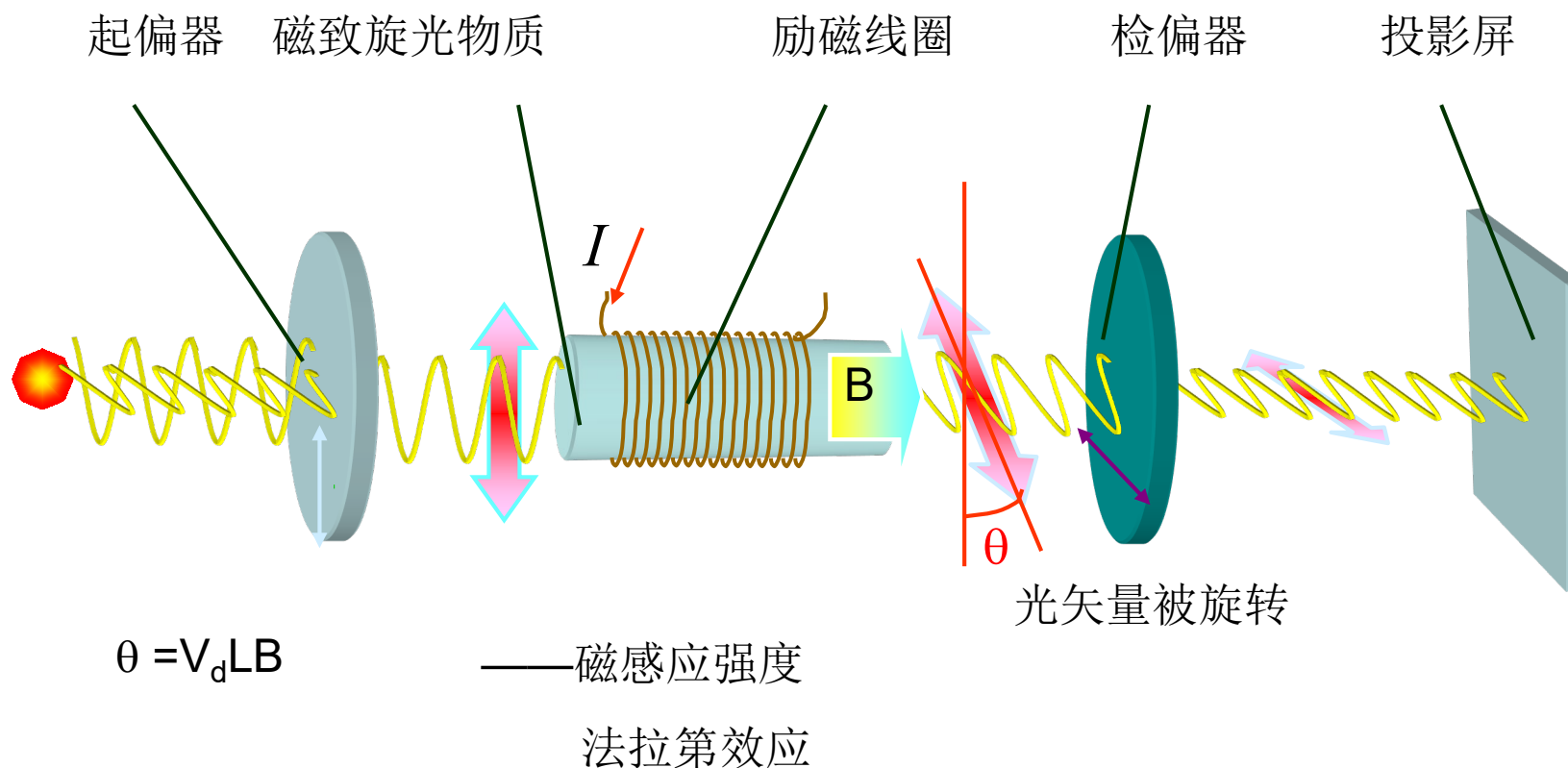
根据光受被测对象的调制形式-强度调制型

3)、反射式强度调制



根据光受被测对象的调制形式-偏振调制型

利用光的偏振态的变化来传递被测对象信息。主要应用于电流（法拉第效应）、电场（泡克尔斯效应）、压力（光弹效应）、温度测量（双折射性）；

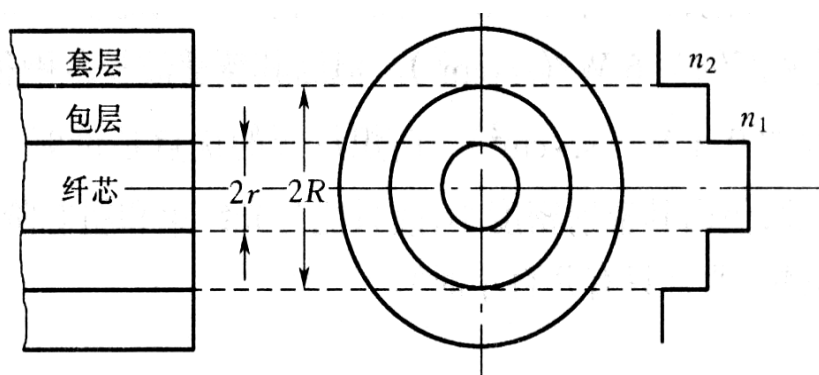


根据光受被测对象的其它调制形式

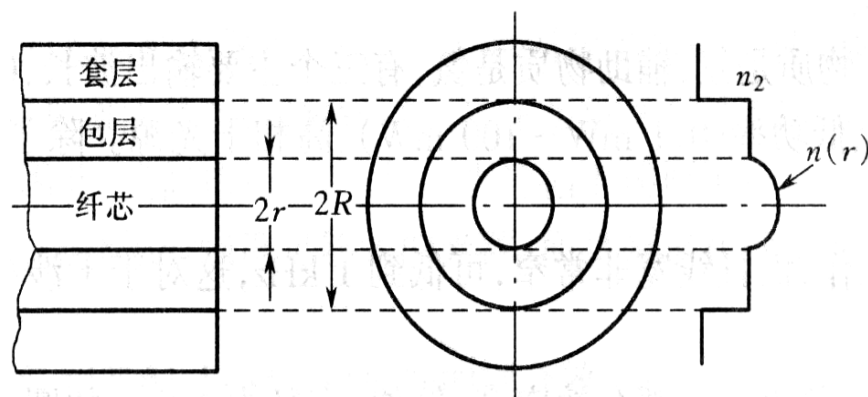
- 基于被测对象的入射光频率与其反射光（或散射光）的多普勒效应，所以主要用来测量运动物体的速度。测量灵敏度特别高。也可利用物质受强光照射时的喇曼散射测量气体浓度或监测大气污染；
- 利用光的偏振态的变化来传递被测对象信息。主要应用于电流（法拉第效应）、电场（泡克尔斯效应）、压力（光弹效应）、温度测量（双折射性）；
- 利用被测对象对敏感元件的作用，使敏感元件的折射率或传播常数发生变化而导致光的相位变化，用干涉仪检出相位变化量而得到被测量，多用于温度测量。

光纤传感器的主要元器件—光纤

- 光纤常见的有阶跃型和梯度型
- 阶跃型光纤与包层间的折射率是突变的
- 梯度型光纤的折射率在纤芯中心处最大，其值由中心向外逐渐变小，到纤芯边界时变为包层折射率。



(a)



(b)

光传输性能和机械强度之间的矛盾—光纤的模式

- 光在光纤的内部以不同的角度传播，传播的角度从零到临界角，传播的角度大于临界角的光线穿过纤芯进入包层（不满足全反射的条件），最终能量被涂敷层吸收。这些不同的光束称为模式。
- 通俗的讲，模式的传播角度越小，模式的级越低。所以，严格按光纤中心轴传播的模式称为零级模式，或基模；其它与光纤中心轴成一定角度传播的光束皆称为高次模。
- 光在单模光纤中的传播轨迹，简单地讲是以平行于光纤中心轴线的形式以直线方式传播

光传输性能和机械强度之间的矛盾—光纤的模式

- 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。
- 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。

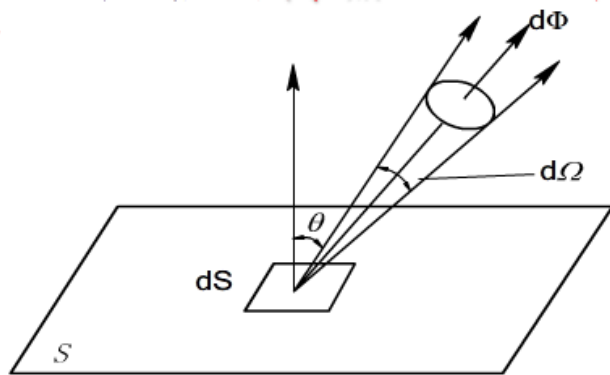
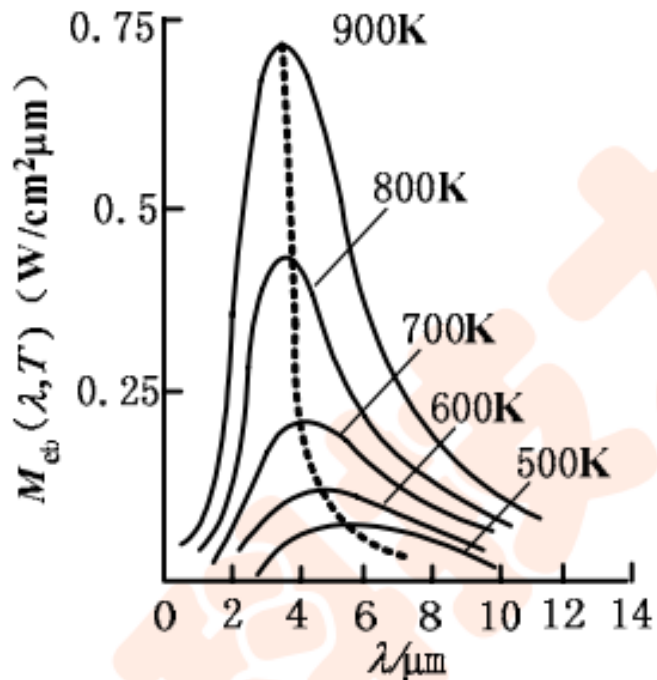
光传输性能和机械强度之间的矛盾

- 在光纤中传播的模式很多时对信息的传播不利，因为同一种光信号采用很多模式就会造成这部分光信号分为不同时间到达接收端的多个小信号，从而导致合成信号的畸变。因此，希望光纤信号模式越少越好。
- 这类光纤传输性能好，频带宽，线性度，灵敏度和动态范围较好，但由于单模纤芯直径太小，制造连接和耦合有一定难度。
- 多模光纤性能差，频带窄，但因芯径尺寸大，制造和耦合比较容易，如梯度型光纤多为多模。

光源

1. 辐射强度足够大，而且要求在敏感元件的工作波长上有最大的辐射功率；
2. 光源必须与光纤相匹配，以获得最佳耦合效率；
3. 光源稳定性好，能长期稳定的工作。
4. 一般要求光源体积尽量小，安装方便

白炽灯光源



光源微面元辐强度特性

钨丝灯泡，近似为黑体辐射源。随着温度的升高，黑体总辐射度增加，峰值波长向短波方向移动。

其优点是：廉价、容易获得、使用方便。

其缺点是：其辐射密度小。在2000K时，在可见光和红外波段约 $0.1\text{W}/(\text{sr}\cdot\text{cm}^2)$ ，稳定性差、寿命通常只有几百小时。

辐亮度：光源在垂直其辐射传输方向上单位表面积、单位立体角内发出的辐射通量。

氦氖激光器，有三个主要输波长：0.63 μm 、1.15 μm 、3.39 μm 。是一种价廉，低功率（0.1~100mW），高相干光源。它具有如下优点：

- 容易实现单模工作，且线宽很窄，可低到1kHz；单色性好。
- 辐射密度高，与单模光纤耦合效率高；直径1mm的园面积氦氖激光器产生输出功率的典型值为1mW，发射角为1mrad。相应的单横模辐射密度约为 $10^8\text{W}/(\text{sr}\cdot\text{cm}^2)$ 。
- 噪声小，除激光腔内的等离子谐振频率外，其余频带基本无噪声产生。

固态激光器主要指固态钕离子激光器等。优点是：体积小巧，坚固耐用；高功率（100mW~几十W），高辐射密度（ $10^9\text{W}/(\text{sr}\cdot\text{cm}^2)$ ），辐射波长在1.06~1.35 μm ；发射光谱均匀且窄，容许单模工作等；缺点：相干性和频率稳定性都不如气体激光器。

半导体激光器

半导体激光器是光纤传感器最重要的光源，它具有体积小、坚固耐用、寿命长、可靠性高、辐射密度适中，电源简单等优点。

半导体激光二极管 (LD) 是具有谐振腔、异质结构的LED，在大电流密度激励下产生激光。辐射功率大都为**10mW**左右，但由于其方向性相当强，故辐射密度高达 **$10^8 \text{W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$** ，工作波长在850nm~900nm，平均寿命可超过 10^6h 。这是一种通用的高功率密度光源。

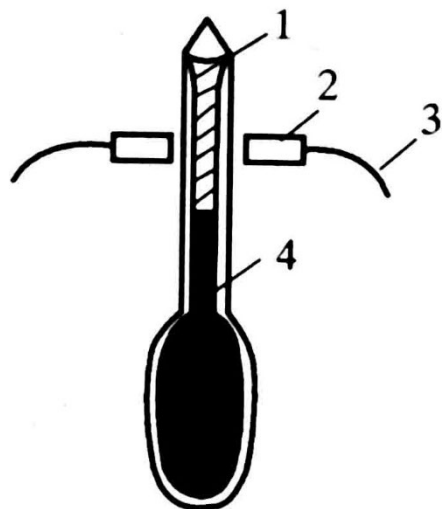
光电检测器件的选择原则

- 1) 在工作波段内灵敏度高，选择相应波段灵敏度高的器件；
- 2) 检测器引入噪声小，应选用暗电流，漏电流和并联电导尽可能小的器件（阻抗尽可能大）；
- 3) 可靠性高，稳定性好。一般要求器件温度系数小，工作偏压高度稳定，必要时采取温度补偿措施。

光电检测	功率范围	波段	量子效率	响应频率	暗电流
光电二极管 (PIN)	受闪烁噪声限制，一般 $P>100\text{mW}$	$0.4\sim1.6\text{ }\mu\text{m}$ 视材料而定	$60\%\sim90\%$ 视材料而定	$>16\text{Hz}$	Si-PIN $100\text{pA}\sim1\text{ }\mu\text{A}$ Ge-PIN $1\text{ }\mu\text{A}\sim10\text{ }\mu\text{A}$
光电倍增管 (PMT)	能检测 10^{-19}W ，通常 $<1\text{nW}$ 功率，太高会损坏阴极	$0.1\sim1.0\text{ }\mu\text{m}$	$>90\%$	$\sim100\text{MHz}$	

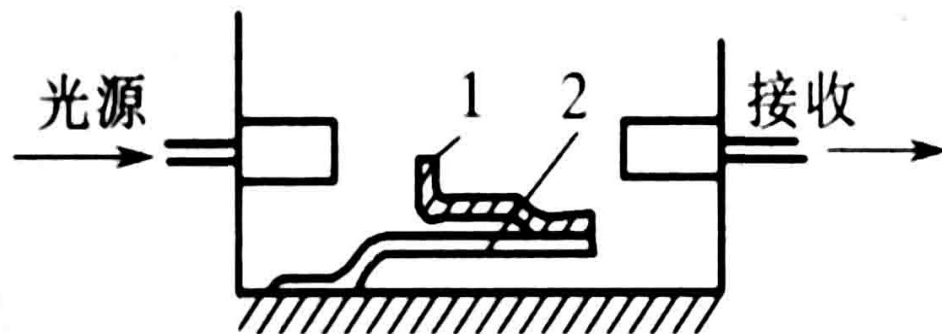
应用：遮光式光纤温度传感器

遮光式光纤温度计



利用水银柱升降温度的光纤温度开关。当温度升高时水银柱上升，到某一设定温度时，水银柱将两根光纤间的光路遮断，从而输出光强产生一个跳变。这种光纤开关温度计可用于对设定温度的控制，温度设定值灵活可变。

利用双金属热变形的遮光式光纤温度计。当温度升高时，双金属的变形量增大，带动遮光板在垂直方向产生位移从而使输出光强发生变化。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—遮光板 2—双金属片

应用：透射型半导体光纤温度传感器

测量机理：半导体的禁带宽度 E_g 是温度的函数。

当一束白光经过半导体晶片时，低于某个特定波长 λ_g 的光将被半导体吸收而高于该波长的光将透过半导体。 λ_g 称为半导体的**本征吸收波长**。要发生本征吸收，光子能量必须大于半导体的禁带宽度 E_g ，即：

$$h\nu \geq E_g$$

将 $\lambda = c/\nu$ 代入上式，得到产生本征吸收的条件为：

$$\lambda \leq \lambda_g = hc / E_g$$

对于波长大于 λ_g 的光，能透过半导体，而波长小于 λ_g 的光将被半导体强烈地吸收。

应用：透射型半导体光纤温度传感器

测量机理：半导体的禁带宽度 E_g 是温度的函数。

而半导体材料的 E_g 随温度的不同而不同， E_g 与温度 T 的关系为

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}$$

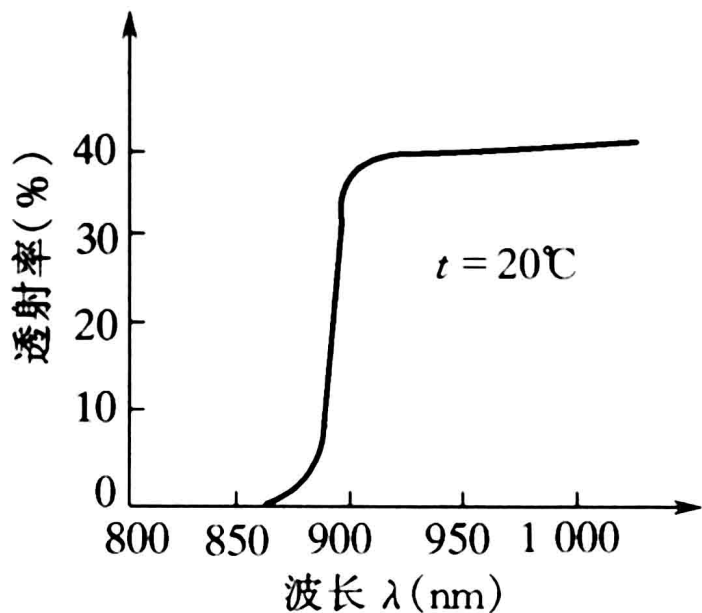
对于GaAs材料，由实验得到

$$E_g(0) = 1.522\text{eV} \quad \alpha = 5.8 \times 10^{-4} \text{eV/K} \quad \beta = 300\text{K}$$

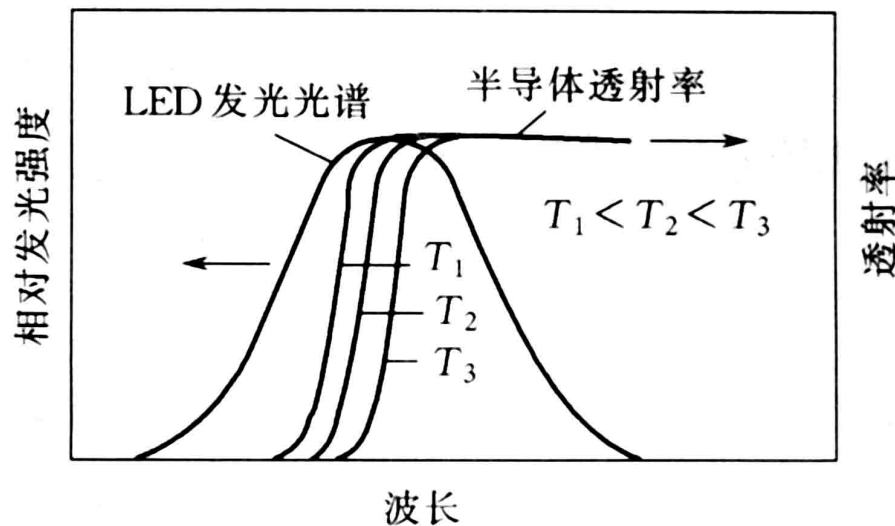
由此可见，半导体材料的 E_g 随温度上升而减小，亦即其本征吸收波长 λ_g 随温度上升而增大。

应用：透射型半导体光纤温度传感器

在室温（20℃）时，120μm厚的GaAs材料的透射率曲线，本征吸收波长约为880μm。

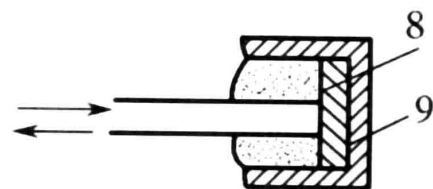
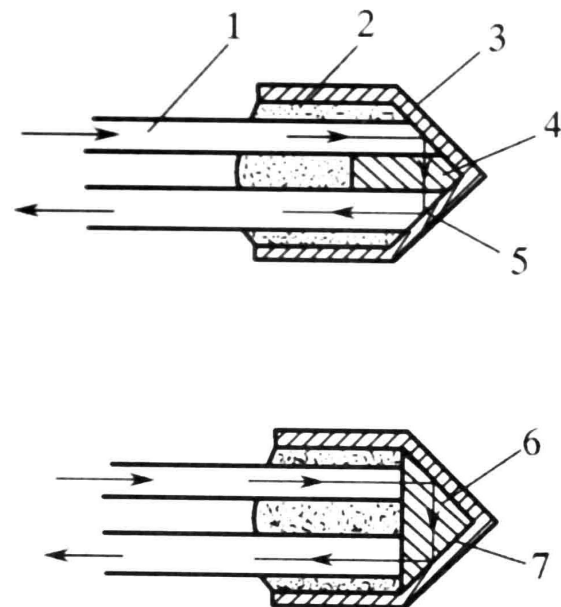
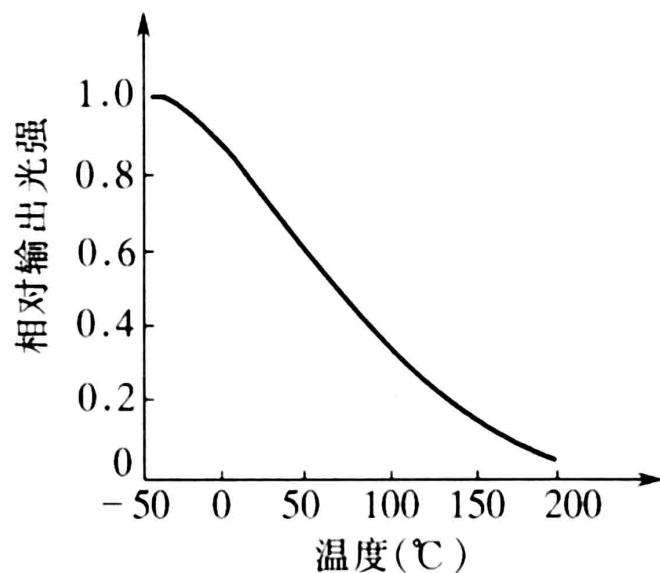


$$\lambda \leq \lambda_g = hc / E_g$$



当温度升高时，其透射率曲线将向长波方向移动。若采用发射光谱与半导体的 $\lambda_g(t)$ 相匹配的发光二极管作为光源，则透射光强度将随着温度的升高而减小。

应用：透射型半导体光纤温度传感器



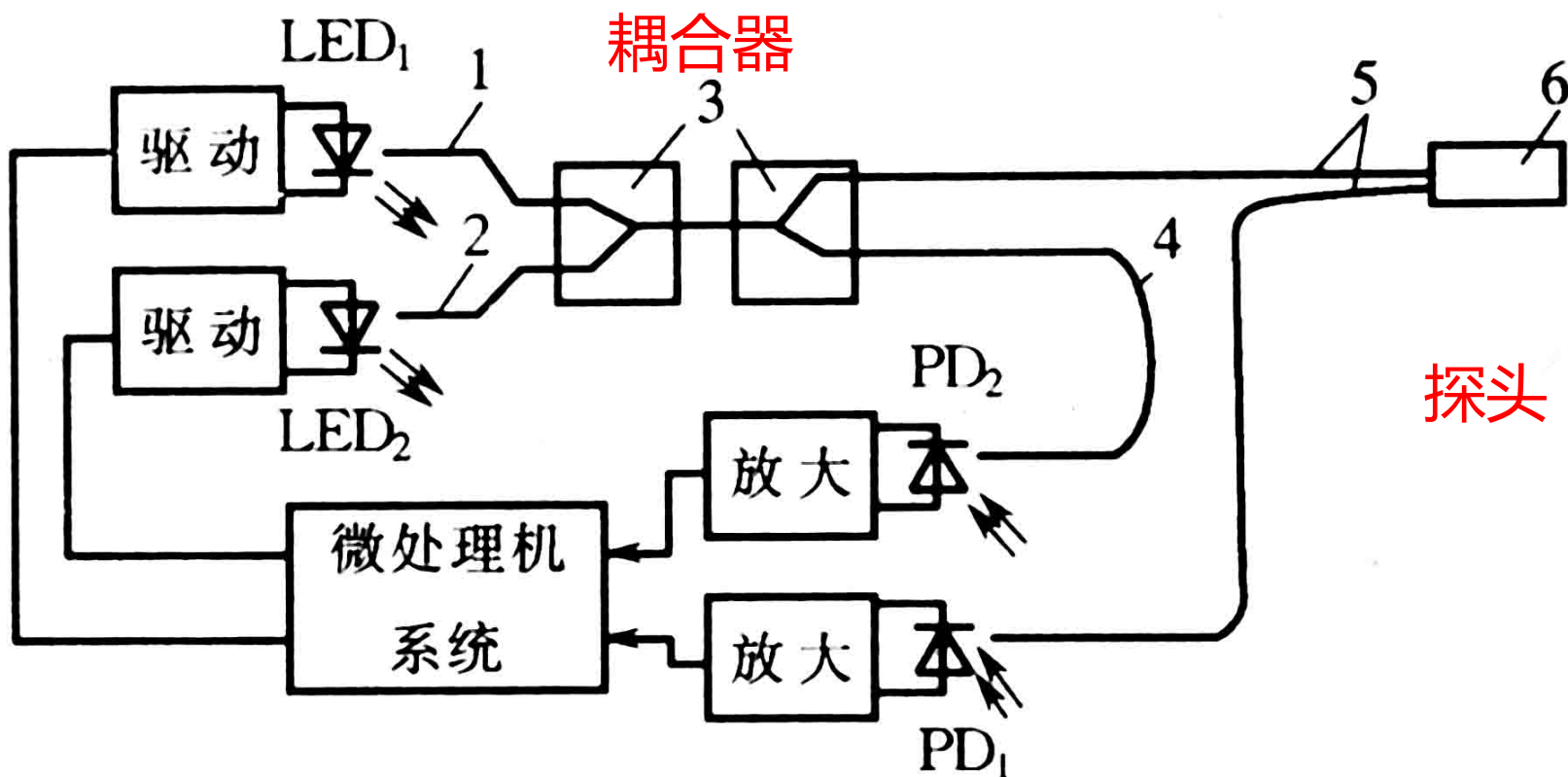
半导体光纤温度传感器的输出特性

1-光纤 2-环氧胶 3-外壳 4、6、8-
半导体 5、7、9-反射膜

三种单端式温度探头的结构

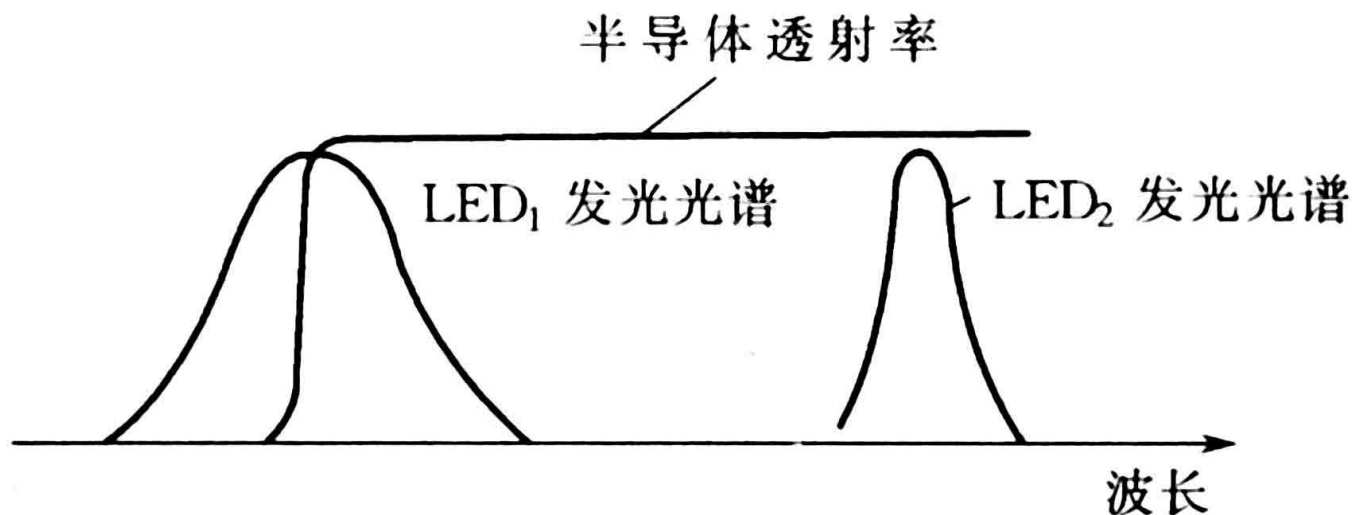
应用：透射型半导体光纤温度传感器

一种采用补偿检测法的半导体光纤温度传感器，解决光源功率波动、损耗变化等因素造成检测精度不高的影响。



应用：透射型半导体光纤温度传感器

图中LED₁为信号光源，其中心波长与半导体本征吸收波长 λ_g 相匹配。LED₂为参考光源，其中心波长大于 λ_g ，如下图所示。



当温度变化时，LED₁发射光通过半导体的透射光强随温度变化而变化，而LED₂发射光的透光强保持不变。

应用：透射型半导体光纤温度传感器

对于LED₁发出的光，在两个探测器PD1和PD2上接收的光强度可分别表示为

$$\text{PD1: } I_{11} = \alpha_1 \gamma \alpha_3 M(t) I_1 \quad \text{PD2: } I_{12} = \alpha_1 (1 - \gamma) \alpha_4 I_1$$

对于LED₂发出的光，两个探测器上接收的光强度分别可表示为：

$$\text{PD1: } I_{21} = \alpha_2 \gamma \alpha_3 I_2 \quad \text{PD2: } I_{22} = \alpha_2 (1 - \gamma) \alpha_4 I_2$$

式中 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ ——与各段光纤有关的综合损耗系数；

γ ——两个Y形光纤耦合器的联合分光比；

$M(t)$ ——信号的调制函数，即LED₁的光通过半导体的透射系数；

I_1 ——光源LED₁的光强；

I_2 ——光源LED₂的光强。

应用：透射型半导体光纤温度传感器

将 I_{11} 、 I_{12} 、 I_{21} 、 I_{22} 分别检测出来后作如下运算

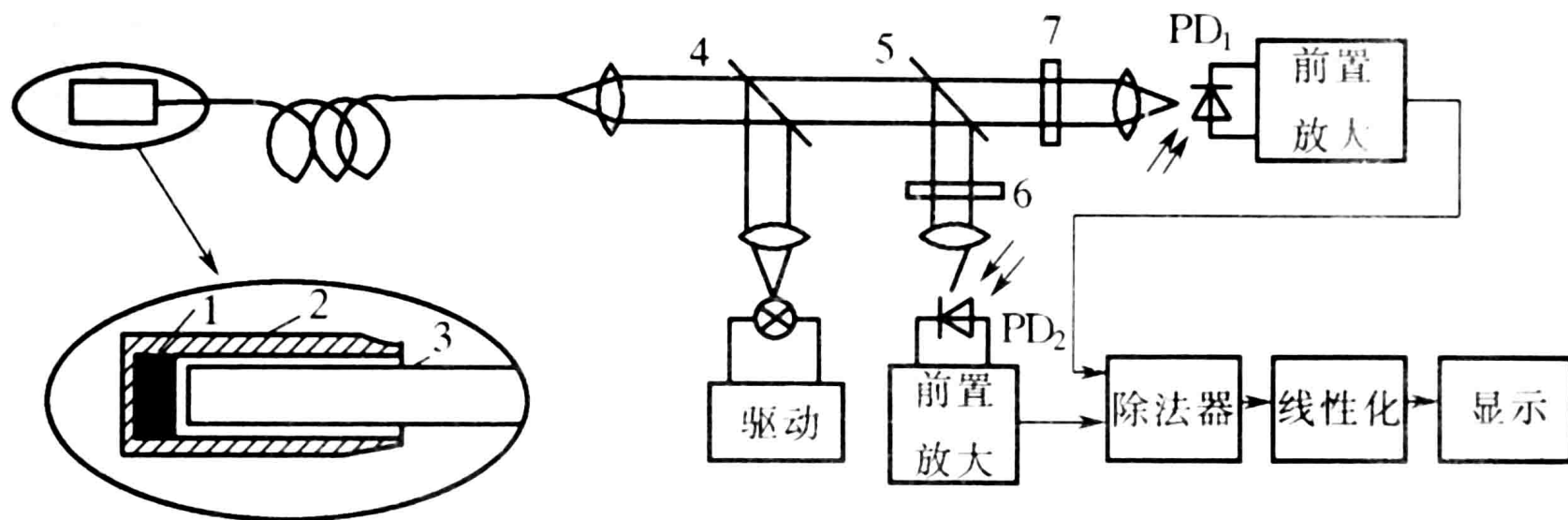
$$I_x(t) = \frac{I_{12}I_{21}}{I_{11}I_{22}} = \frac{\alpha_1(1-\gamma)\alpha_4I_1\alpha_2\gamma\alpha_3I_2}{\alpha_1\gamma\alpha_3M(t)I_1\alpha_2(1-\gamma)\alpha_4I_2} = \frac{1}{M(t)}$$

得到的结果只与温度信号有关，而与其他所有的损耗及光源强度无关。

采用了补偿法的光纤温度传感器的精度及稳定性都有很大的提高，检测精度可达 0.1°C 。

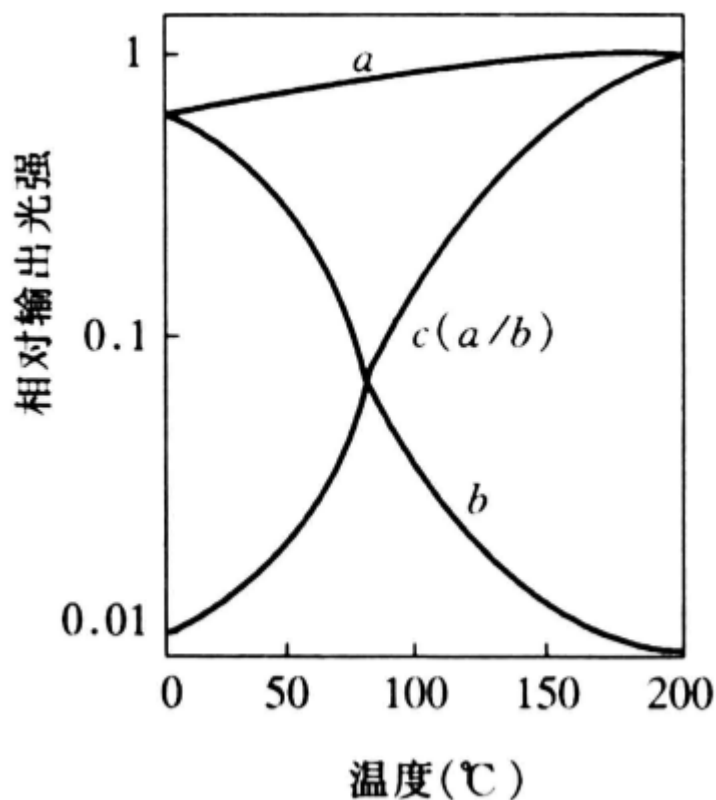
应用：荧光发光型光纤温度传感器

某些荧光物质在紫外光激励下能发出可见光，紫外光激励荧光光纤温度传感器，其发射光谱与温度有关。某些波长的荧光强度对温度有强烈的依存关系，因此可以通过检测特性波长的荧光强度即可测出温度的变化。

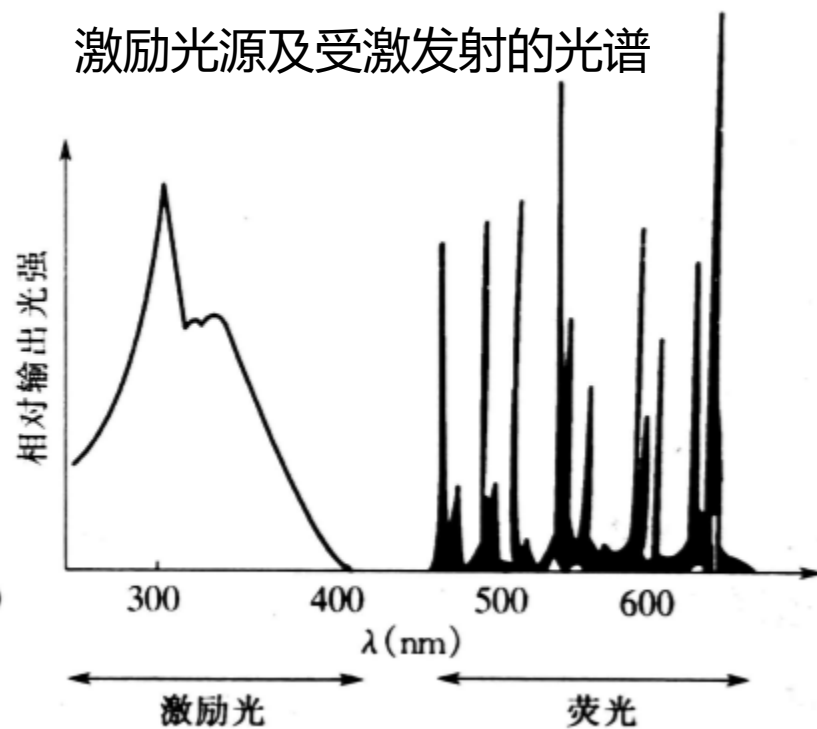


用于高压变压器的线圈温度检测的光纤荧光温度计

应用：荧光发光型光纤温度传感器



曲线a 波长630nm的谱线强度与温度关系
曲线b 波长510nm的谱线强度与温度关系



荧光光纤温度计能精确地测量-
50~200℃的温度，检测精度达
0.1℃。