



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY

光电信息科学与工程

第7章 光纤技术及应用

7.1 光学纤维的基本工作原理及分类

光纤由纤芯、包层及外套组成，如图7-1所示。纤芯是由玻璃、石英或塑料等制成的圆柱体，一般直径约为 $5\text{-}150\mu\text{m}$ 。围绕着纤芯的那一层叫包层，材料也是玻璃或塑料等。纤芯的折射率 n_1 稍大于包层的折射率 n_2 。由于纤芯和包层构成了一个同心圆双层结构，所以光纤具有使光束封闭在纤芯里面传输的功能。外套起保护光纤的作用，它的折射率 n_3 大于包层的折射率 n_2 。通常人们把较长的或多股的光纤称为光缆。

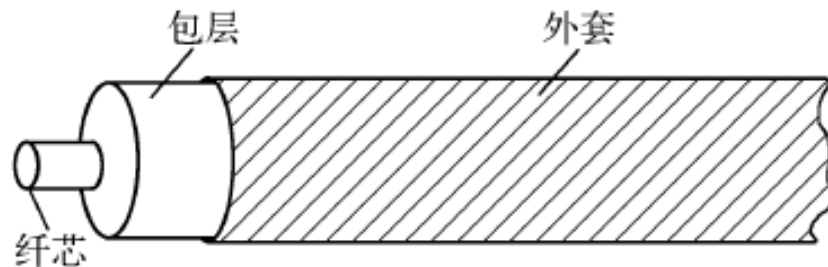


图7-1 由纤芯、包层及外套组成的光纤的结构示意图

7.1 光学纤维的基本工作原理及分类

本节主要包括以下几部分内容：

7.1.1 光纤的基本工作原理及分类

7.1.2 主要的光纤制品

7.1.3 光纤的耦合

7.1.1 光纤的基本工作原理及分类

1. 阶跃光纤的传光原理

光束入射到介质界面上，光束将产生反射和折射，其中折射光束的方向可由折射定律给出， $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ ， n_1, n_2 分别为两介质的折射率； i_1, i_2 分别为光束的入射角和折射角。当 $n_1 > n_2$ 时，也就是当光束由光密介质向光疏介质传播时，有 $i_2 > i_1$ 随着 i_1 的增大 i_2 也将增大，当时，折射光束消失，而入射光束被该界面全部反射，这一现象叫作全反射。而对应的入射角 $i_1 = i_0$ 叫作临界角，其值可由折射定律给出

$$i_0 = \arcsin(n_2 / n_1) \quad (7-1)$$

利用这一原理制成的最简单的光纤是圆柱形光纤。

图7-2为圆柱光纤的主截面，它是由均匀的高折射率材料的圆柱芯和低折射率材料的外围包层所构成。图中还给出了折射率按径向分布的曲线图。由曲线可知，芯、皮料中折射率均匀，只是在两界面处突变，因此又把这类光纤叫作阶跃折射率光学纤维，简称阶跃光纤。

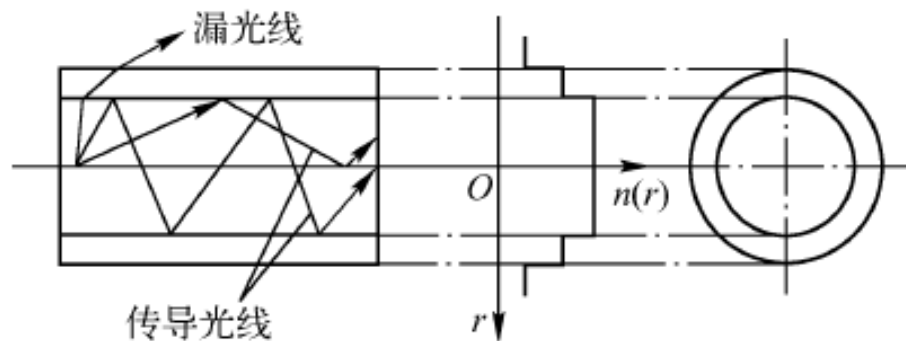


图7-2 圆柱形阶跃光纤

光纤数值孔径NA：采用几何光学的定义，将光束入射光线端面全反射临界角 θ_0 与所处介质折射率的乘积，定义为光纤数值孔径NA。

$$NA = n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta'_0 \quad (7-2)$$

可以导出在主截面或子午面内，光纤数值孔径的理论值

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7-3)$$

光纤的数值孔径是表征光纤元件特性的重要参量之一。衡量光纤特性的另一个重要参量是透射比

$$\tau = \Phi_0 / \Phi_i \quad (7-4)$$

式中， Φ_i 入射光纤的光通量； Φ_0 出射光纤的光通量。

设

$$\Phi_i = \int_0^{\theta} \Phi(\theta) d\theta \quad (7-5)$$

式中， $\Phi(\theta)$ 为入射光纤端面的光通量角分布函数。

在光纤长度为 L ，直径为 d 的条件下，对应输出光纤光通量的表达式为

$$\Phi_0 = \int_0^\theta \Phi(\theta) [1 - R(\theta)]^2 (1 - A)^{n(\theta)} \exp[-\alpha_0 P(\theta)] d\theta \quad (7-6)$$

式中， $[1 - R(\theta)]^2$ 为考虑光纤输入输出两端面反射损失对透射比的影响， $(1 - A)^{n(\theta)}$ 为考虑光束在光纤中 $n(\theta)$ 次全反射损失对透射比的影响。 A 是一次全反射的损失系数； $\exp[-\alpha_0 P(\theta)]$ 为考虑纤芯材料对光束的吸收损失对透射比的影响。 α_0 为纤芯材料的吸收系数， $P(\theta)$ 为全反射光束在光纤中的路程。

利用几何关系可知：

$$n(\theta) = L \sin \theta / d (n_1^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} = (L/d) \operatorname{tg} \theta' \quad (7-7)$$

$$P(\theta) = L / [1 - (\sin \theta / n_1)^2]^{\frac{1}{2}} = L \sec \theta' \quad (7-8)$$

当光束不经过光纤轴而以斜光束入射时，数值孔径表达式为

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} / \cos \gamma \quad (7-9)$$

式中， γ 为斜光束入射面与光纤圆柱端面所交弦和直径之间的夹角。

2. 梯度折射率光纤的工作原理

该光纤又称变折射率光纤。其光纤径向折射率分布及导光情况如图7-3所示。折射率的分布公式为

$$n(r) = \begin{cases} n(0)[1 - \frac{1}{2}\Delta(r/a)^\alpha] & r < a \\ n(a) & r \geq a \end{cases} \quad (7-10)$$

式中， a 为光纤纤芯的半径； $n(0)$ 、 $n(r)$ 、 $n(a)$ 分别为轴上、距轴 r 处和皮层的折射率； Δ 为相对折射率差； α 为变折射率分布的幂。

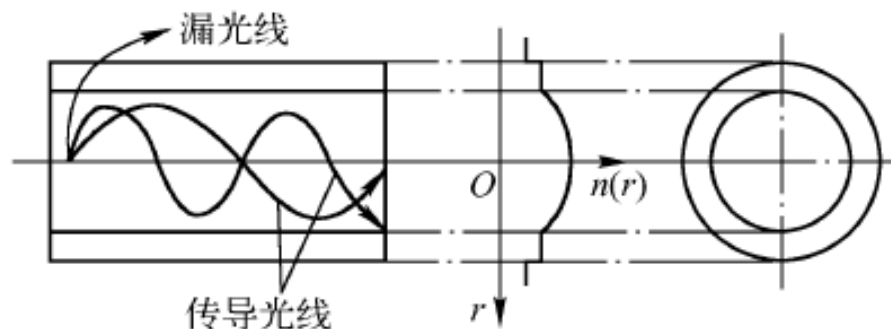


图7-3 圆柱形梯度光纤

变折射率光纤中光束的路程公式，满足费马原理，即

$$\int_s n(r) ds = \text{const} \quad (7-11)$$

解出对于近轴光束的近似折射率表达式

$$n(r) \approx n(0) \left(1 - \frac{1}{2} A r^2\right) \quad (7-12)$$

式中， A 为折射率分布常数，又称聚焦常数。这种光纤叫作聚焦光纤。当光纤直径达1 mm左右时可叫作聚焦棒透镜；如其折射率分布为

$$n(r) = n(0) \left(1 + \frac{1}{2} A r^2\right) \quad \text{则为发散光纤。}$$

光束在聚焦光纤中的轨迹可以由下式给出

$$r_2 = r_1 \cos(\sqrt{A} Z) \quad (7-13)$$

式中， r_1 、 r_2 为分别为光束入射点和出射点的位置坐标； Z 为光纤的长度坐标

光束在抛物线分布的变折射率光纤中，传输的轨迹是一正弦型曲线，如图7-4所示。

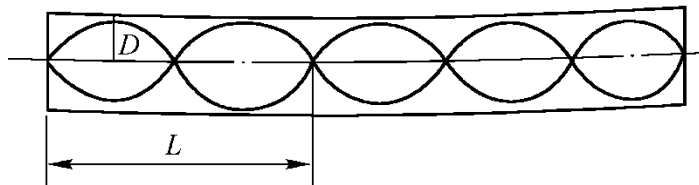


图7-4 光线传输轨迹

聚焦光纤没有固定的数值孔径，在半径 r 处，其值 NA 可用下式表示

$$NA_r = n_0 \sin \theta_r = [n^2(0) - n^2(a)]^{\frac{1}{2}} (1 - r^2 / a^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7-14)$$

式中， a 为纤芯的半径； θ_r 为 r 处的孔径角； $[n^2(0) - n^2(a)]^{\frac{1}{2}}$ 相当于折射率分别为 $n(0)$ 和 $n(a)$ 所构成的阶跃光纤的数值孔径 NA_G 。

上式可写为

$$NA_r = NA_G (1 - r^2 / a^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7-15)$$

用于聚光和成像的光纤叫做聚焦型光纤棒透镜。其直径可由几十微米到几十毫米，主要的光学性能有：

(1) 聚焦：

$$f = [n(0)\sqrt{A} \sin(\sqrt{A}Z)]^{-1} \quad (7-16)$$

(2) 焦点位置：

$$s = [1 / n(0)\sqrt{A}] \cdot \cot(\sqrt{A}Z) \quad (7-17)$$

(3) 主面位置：

$$h = [1 / n(0)\sqrt{A}] \cdot \tan(\sqrt{A}Z) \quad (7-18)$$

(4) 成像位置：

$$l_2 = \frac{1}{n(0)\sqrt{A}} \cdot \frac{n(0)\sqrt{A}l_1 \cos(\sqrt{A}Z) + \sin(\sqrt{A}Z)}{n(0)\sqrt{A}l_1 \sin(\sqrt{A}Z) - \cos(\sqrt{A}Z)} \quad (7-19)$$

(5) 横向放大率：

$$M = [n(0)\sqrt{A}l_1 \sin(\sqrt{A}Z) - \cos(\sqrt{A}Z)]^{-1} = \mp \left[\frac{An^2(0)l_2^2 + 1}{An^2(0)l_1^2 + 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7-20)$$

3. 光纤分类

按光纤使用波段分类，有紫外光纤，可见光光纤和红外光纤等；不同波段应选用适宜的材料。

按光纤制作的材料分类，有玻璃光纤、塑料光纤和液芯光纤等。

按光纤内折射率的分布形式分类，有普通阶跃折射率分布光纤和变折射率光纤两种。

按光纤传输模式分类，有单模光纤和多模光纤两种。从光纤参量上看，单模或多模光纤可用下式判别

$$V = ak(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7-21)$$

式中， a 为纤芯半径； k 为等于，为待传光束的波长； n_1 ， n_2 为光纤芯料，皮料的折射率；当 $V < 2.40485$ 时为单模光纤，当 $V > 2.40485$ 时为多模光纤。

7.1.2 主要的光纤制品

1. 光纤传输线

图7-5为常用的光纤传输线。



图7-5 光纤传输线

光纤传输线的主要性能如下：

(1) 光能传输损耗

传输损耗用(dB / km)来标志，式中 P_1 是输入光纤的光功率： P_2 是传输1km后射出光纤的光功率。

(2) 数值孔径NA

希望光纤传输线具有适当的数值孔径。数值孔径大，可增大入射光锥角，获得大的通光量；但是过大容易激起高次模式的传输，对要求模式色散小的场合，特别是希望单模传输的场合不利。

(3) 模式分布

通讯光纤的重要参量。从传输信号的容量来说，单模容量最大，模数越少，容量越大。这时的芯径必然很细，对传光不利。要使传光量大则希望采用多模传输，相应信息容量就要减少。这一矛盾只能根据具体要求，如容量、距离以及传输线的其它特性来统一考虑。

(4) 传输带宽

通讯光纤传输信息容量的标志，是用对窄脉冲传输造成展宽的程度来确定。脉冲展宽是由光纤色散造成，这里的色散包括光纤材料的色散和传输模式的色散。对该特性的要求也只能按具体情况来确定。

(5) 强度

为满足加工及通讯施工中的工艺需要，希望光纤传输线有高的强度。目前有的光纤强度可高达 $200\text{kg} / \text{mm}^2$ 。

2. 传光束

传光光纤器件又叫传光束，是由多根单光纤组合而成。传光束用于传递光通量，因此对其特性的主要要求是透射比高、数值孔径大，便于弯曲以有利于在各种场合中使用。按照具体需要传光束可构成多种形式如图7-6所示。

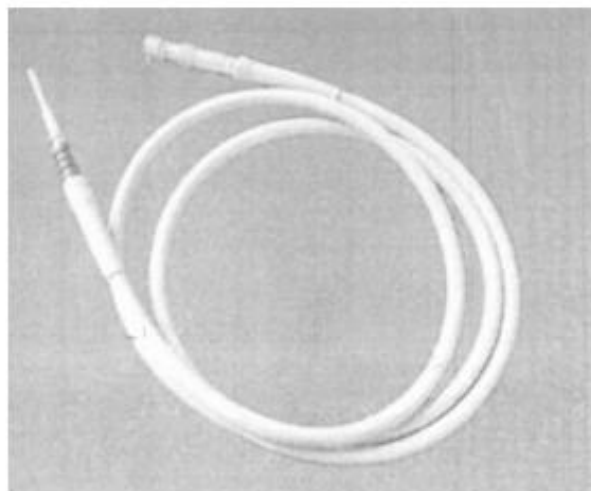


图7-6 各种传光束

3. 传像束

光纤传像束也是由多根单光纤组合而成。在排列上要求输入端与输出端的空间阵列相对应，以确保图像的正确传输。对于光纤传像束来说，除与传光束相同的特性要求外，对其传像特性有一定的要求。其中主要是分辨力率，调制传递函数等，图7-7为常用的各种传像束。

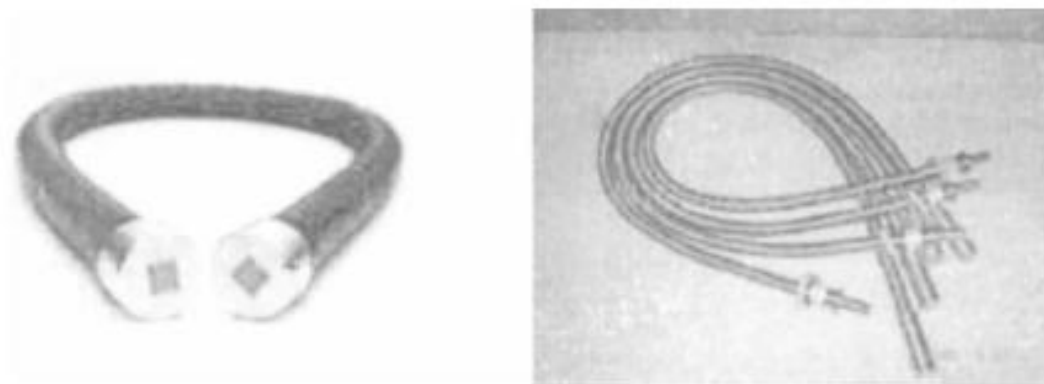


图7-7 各种传像束

4. 光纤面板

光纤面板是一种板厚远小于板直径的板状传像元件。它是用多根单光纤或复合光纤经热压工艺而制成的真空气密性良好的光纤棒，然后按需要切片、磨光而成的光纤器件。图7-8为各种常用的光学纤维面板。

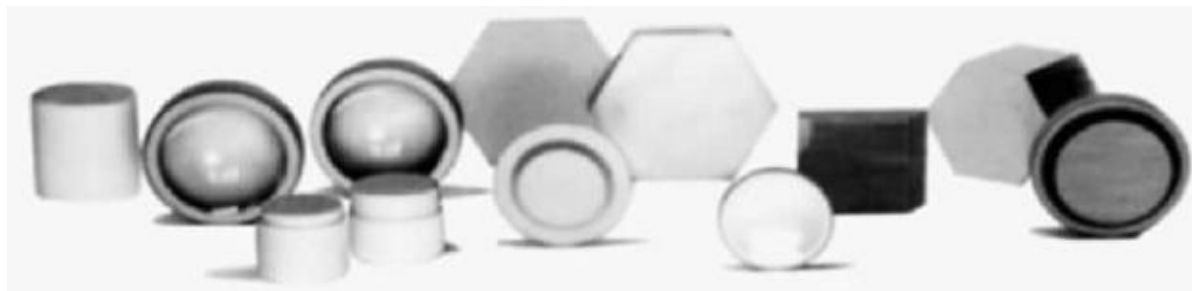


图7-8 各种光学纤维面板

光纤面板的主要特性：

(1) 透射比

光纤面板的透射比通常有积分光准直透射比、积分光漫射透射比，准直光谱透射比和漫射光谱透射比之分，根据使用场合的具体情况提出不同的要求。

(2) 数值孔径 NA

常用光纤面板传递漫射图像，所以希望它们有大的数值孔径。通常在理论设计时使 $NA \geq 1$ 。

(3) 分辨力

可用每毫米中可分辨的黑白线对数表示。

(4) 调制传递函数

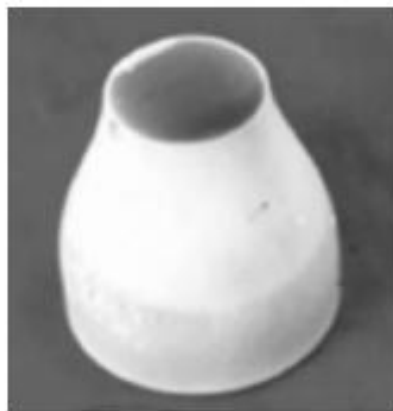
传像器件的传递特性可用调制传递函数表示。目前对光纤面板传像特性又常用刀门响应来表示。

表 7-1 典型面板的刀口响应

距刀口距离 (μm)	12	25	50	125	375
响应 (%)	4	1	0.5	0.25	0.15

(5) 真空性能及工艺性能

与光纤面板同类的制品还有光纤光锥、光纤扭像器以及各种光纤传感器等。如图7-9所示为光纤光锥和光纤扭像器。



(a) 光纤光锥



(b) 光纤扭像器

图7-9 各种光纤制品

7.1.3 光纤的耦合

常用的耦合器有以下3种结构形式：

（1）把每根光纤埋入玻璃块的弧形槽中，将其侧面研磨抛光，使光纤耦合处的包层厚度达到一定的要求，然后将两根光纤拼接在一起，如图7-10(a)所示。

（2）将两根光纤稍加扭绞，用微火炬对耦合部位进行加热，在熔融过程中拉伸光纤，最后拉细成型，如图7-10(b)所示。

（3）将光纤的局部外套去掉，腐蚀掉光纤耦合部位的大部分包层，并将两根光纤的纤芯紧紧接触在一起，然后进行加固。如图7-10(c)所示。

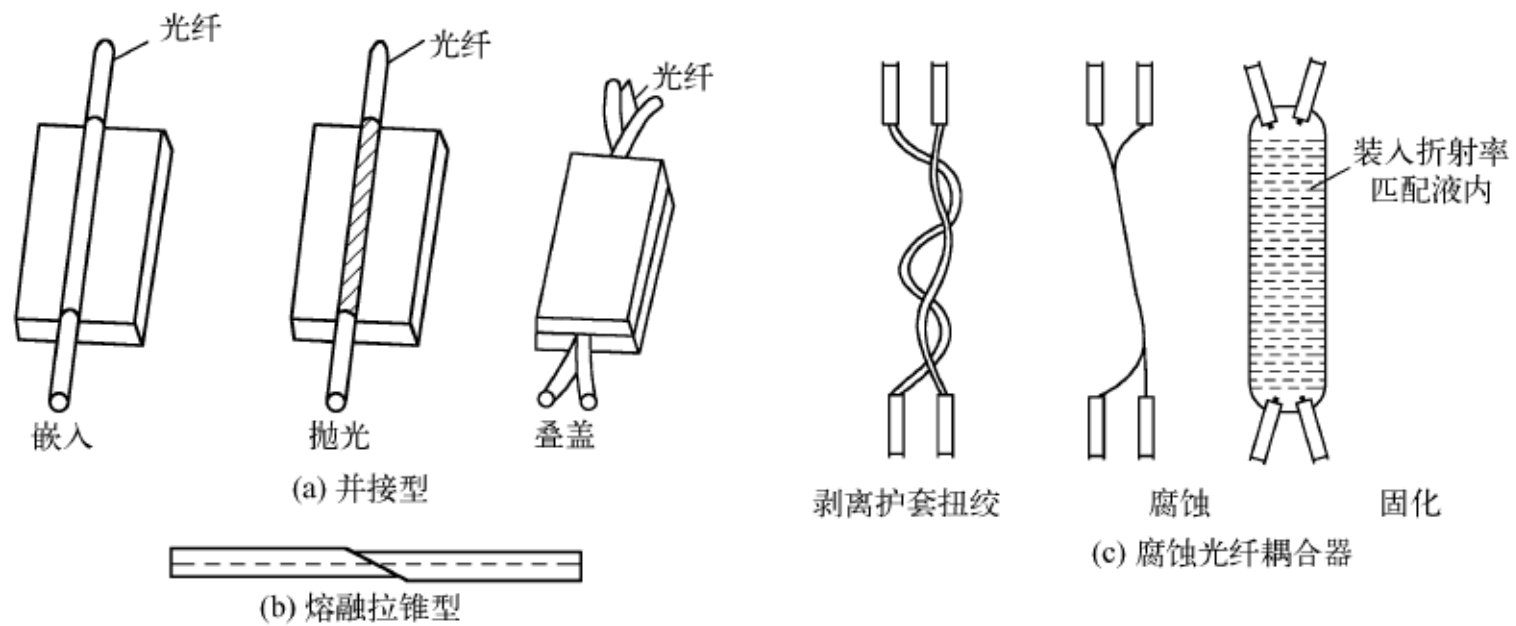


图7-10 耦合器

7.2 光纤器件主要参量的光电检测

本节主要包括以下几部分内容：

7.2.1 光纤器件数值孔径的测量

7.2.2 光纤器件透射比的测量

7.2.3 光纤器件刀口响应的测量

7.2.4 光纤器件色散特性的测量

7.2.1 光纤器件数值孔径的测量

1. 测量定义

数值孔径的理论定义是 $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}$ 物理定义为 $NA = n_0 \sin \theta_0$ 实际测量中，应找出光纤输入端入射光线满足全反射条件的最大孔径角 θ_0 ，这将涉及某个极限量的测量，实际测量中极限量难以正确判断。

2. 测量装置及原理

图7-11所示为光纤面板数值孔径测试仪的工作原理。

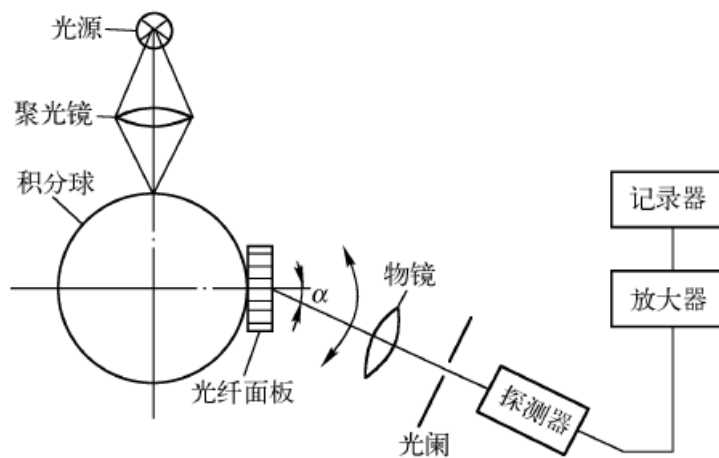


图7-11 光纤面板数值孔径测试仪的工作原理示意图

3. 装置设计中的几个问题

(1)在测定角分布的过程中，要不断改变转角 α ，从0至 $\pi/2$ 之间取点的多少将直接影响最终结果的精度。常取 0.5° 作为角步距。

(2)当 $\alpha=0$ 时，信号值最大。该位置的确定也是一个极限值的测量问题，常采用对称取值和几何位置标定的方法，尽力获得这一中心位置。为确保精度，采用0到 $\pm\pi/2$ 的双向测量，然后平均取值。

(3)为使光电探测系统对不同角度的光信号进行测量，要通过转动该系统来实现，无面板时转动中心在积分球输出光孔面的中心线上，而有面板时转动中心应移到光纤面板输出端的中心上。当采用光电探测系统被旋转时，则装置体积必然很大；如改用光源，积分球系统转动则机构大为减小。

(4)该测量的角度测量点，按上述要求为360个，完成一块光纤面板的测量将有720个数据，这些数据的处理、存储、计算和输出应采用计算机来完成。

(5)由于透射比要进行两次测量，所以要求光源发光稳定，常用稳流源给光源供电。另外对光源色温和探测器光谱特性也应有共同的约定，以确保测量的精度和一致性。

7.2.2 光纤器件透射比的测量

以光纤面板的漫射光谱透射比为例，其装置原理如图7-12所示。

光纤器件漫射光光谱透射比测量中应注意的问题可归纳如下：

- (1)光源的稳定性要求与数值孔径测量时一样。
- (2)光谱范围的选定，依待测光纤器件的要求而定。
- (3)在有关光谱特性的测量中，要求各单色光有良好的单色性。
- (4)在测定光谱范围内，测量点采样间隔的大小应由实际要求确定。
- (5)光纤器件光谱透射比分布的测量需对多点进行两次测量，并需对测得数据存储、计算等处理，所以应采用计算机。

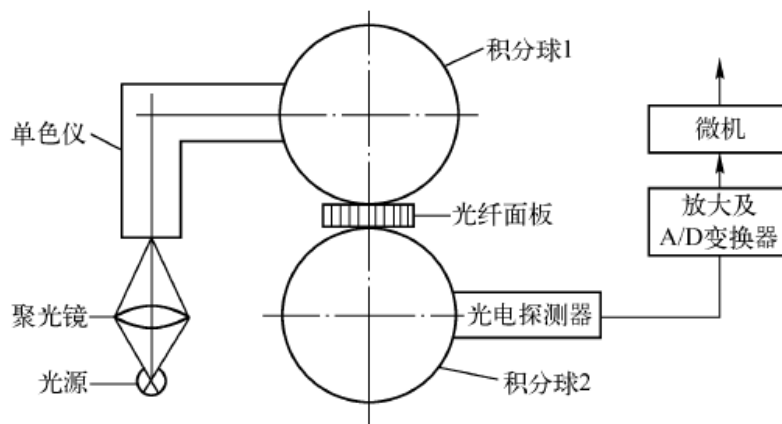


图7-12 光纤面板漫射透射比测试仪

7.2.3 光纤器件刀口响应的测量

刀口响应的测量原理如图7-13所示。

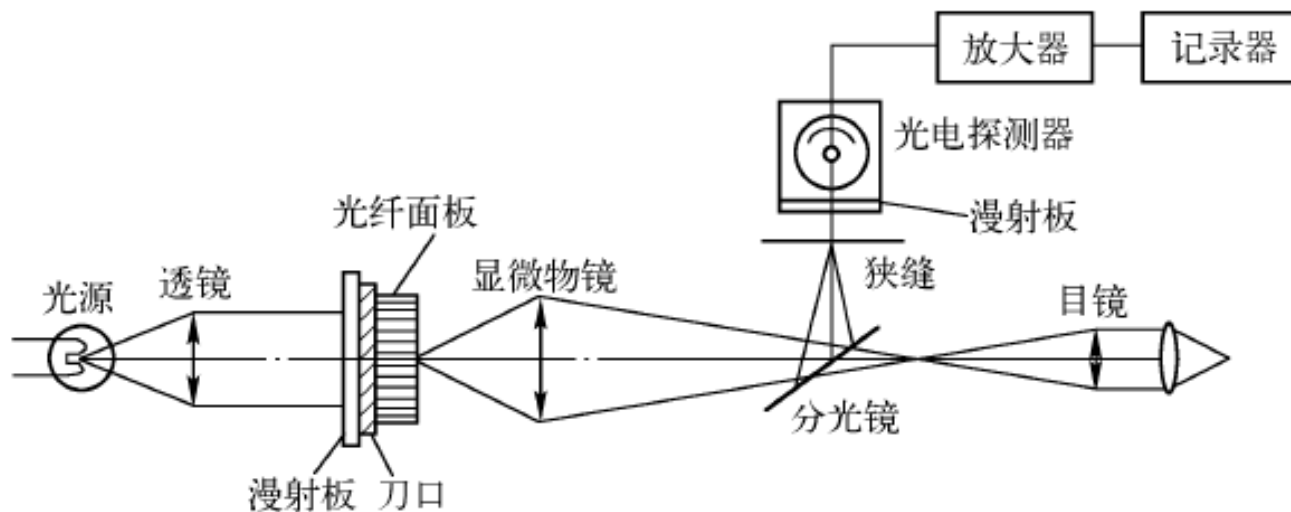


图7-13 光纤面板刀口响应测试仪

在光纤器件的刀口响应的测量中应注意的问题：

(1)由于光纤器件常具有大数值孔径的特点，为与实际应用相一致，在测试时应满足大数值孔径测定的条件。

(2)全部测量点的移动距离几微米到几百微米，移动量很小，需要精密的移动机构和准确的检测微量位移的手段。

(3)在刀口影处所测定透光量将很小，需要高灵敏度的探测器和良好的消除杂光干扰的措施。

(4)刀口响应的测点距离应从刀口对应的零位开始计量，但零位不好确定。通常的确定方法是当通光率下降到无刀口遮挡处的50%时所对应的点作为测量零位。

7.2.4 光纤器件色散特性的测量

这一特性主要是针对通讯光纤提出，色散的大小直接影响光纤通讯的容量。下面介绍脉冲法测定全色散的系统，其原理如图7-14所示。

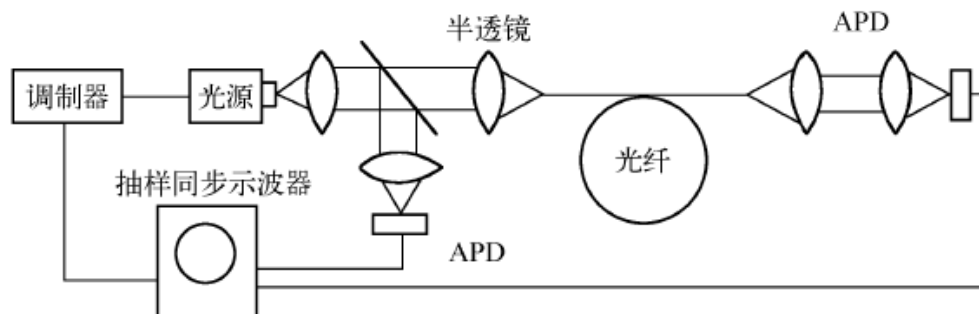


图7-14 脉冲法测定全色散系统

当输入光纤的脉冲波形为 $x(t)$ ，输出波形为 $y(t)$ 时，脉冲响应为 $h(t)$ ，如果它们都是高斯波形，其宽度分别为 Δt_1 、 Δt_2 和 Δ 。它们之间有下列线性关系

$$y(t) = \int_0^t h(t - \tau)x(\tau)d\tau \quad (7-22)$$

且有 $\Delta t_2^2 = \Delta t_1^2 + \Delta \tau^2$

7.3 光纤制品的一般应用

本节主要包括以下几部分内容：

7.3.1 光纤通信

7.3.2 光纤在直接导光方面的应用

7.3.3 光纤制品在传像方面的应用

7.3.1 光纤通信

光通讯系统的工作原理如图7-15所示。

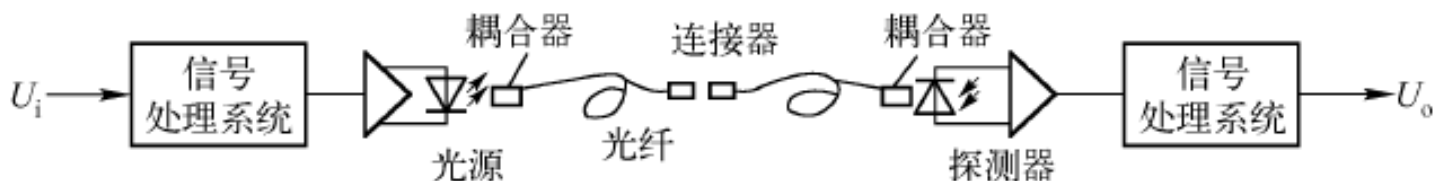


图7-15 光纤通讯系统原理

主要部件介绍：

光源大多采用半导体光源或半导体激光器。

探测器通常要求灵敏度高、响应快、并具有噪声低的特点。常用的有硅或锗的光电二极管($0.75\sim 0.9\mu\text{m}$)、PIN型光电二极管和APD型(雪崩)光电二极管等。

耦合器的作用是让光源发出的光通量尽可能多地进入光纤，这是光纤通讯的重要课题。直接耦合损耗很大，图7-16所示是几种耦合方案和可能造成损耗量的大小。

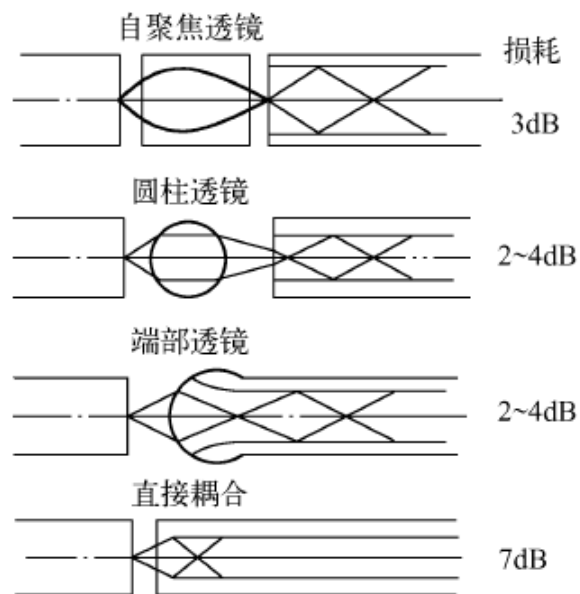


图7-16 几种耦合方案及损耗

7.3.2 光纤在直接导光方面的应用

1. 光纤照明器

图7-17所示为实现线状照明的例子。图7-18所示是多路照明的原理。

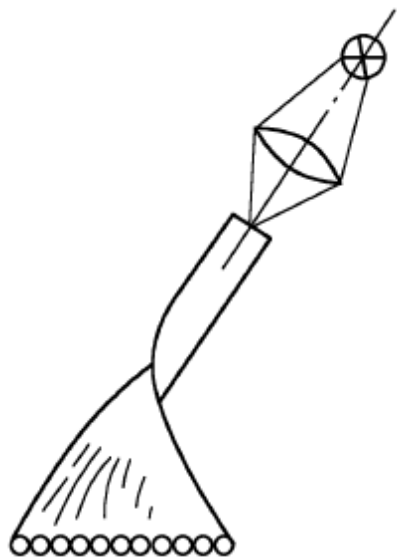


图7-17 线状照明系统

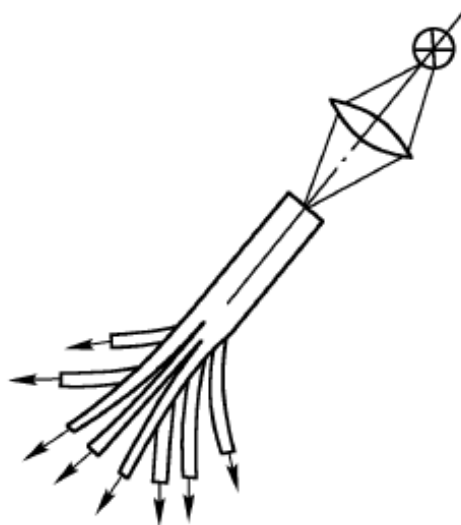


图7-18 多路照明系统

2. 直接导光光纤在检测中的应用

在检测技术中光纤直接导光束常制成叉型。又叫做Y光纤。如图7-19所示。

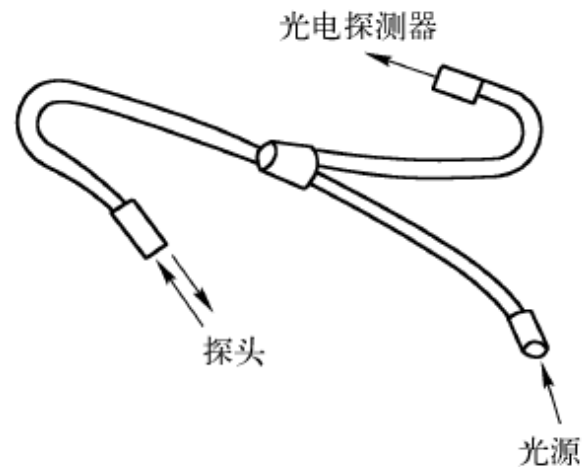


图7-19 Y光纤外形

利用Y型光纤构成的天线型光纤位移传感器如图7-20所示。

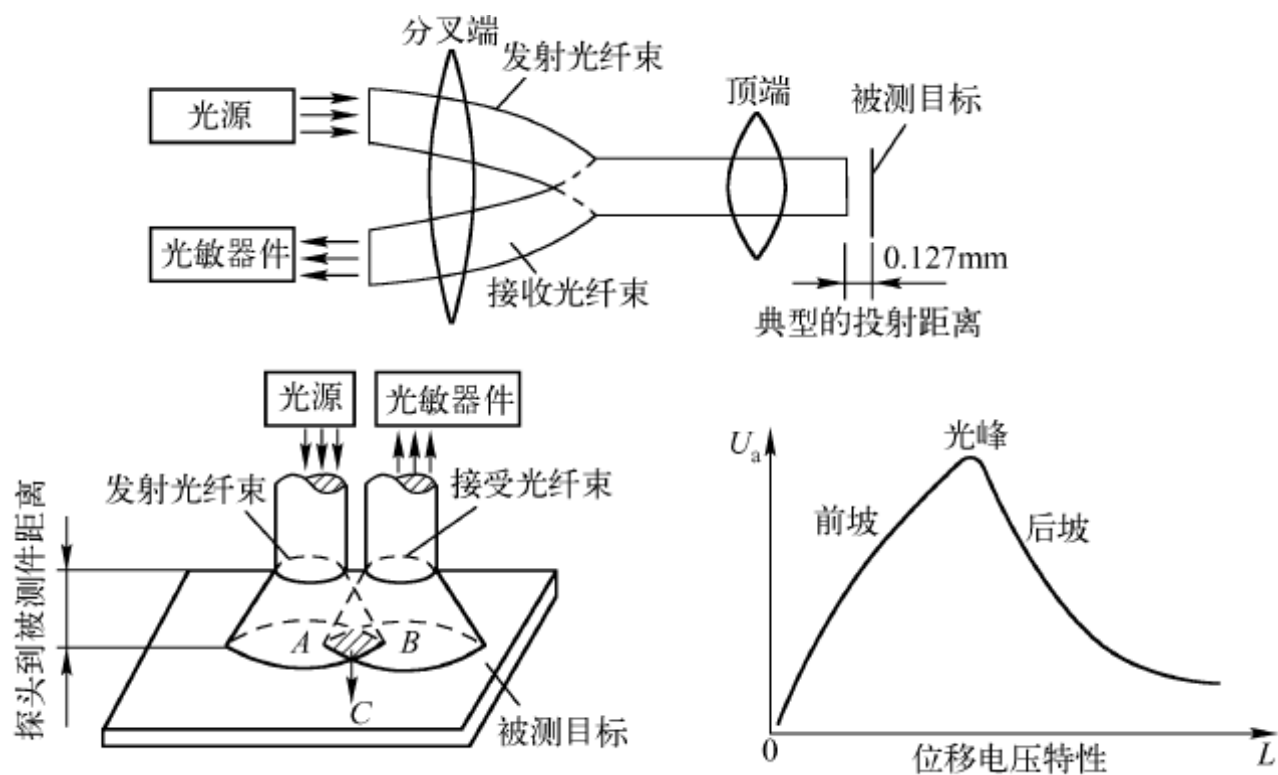


图7-20 天线型光纤位移传感器原理及特性

3. 光纤束行扫描器

利用直线—圆环光纤转换器和Z型导光管可以对移动目标实现图像信号的采集，如图7-21所示。

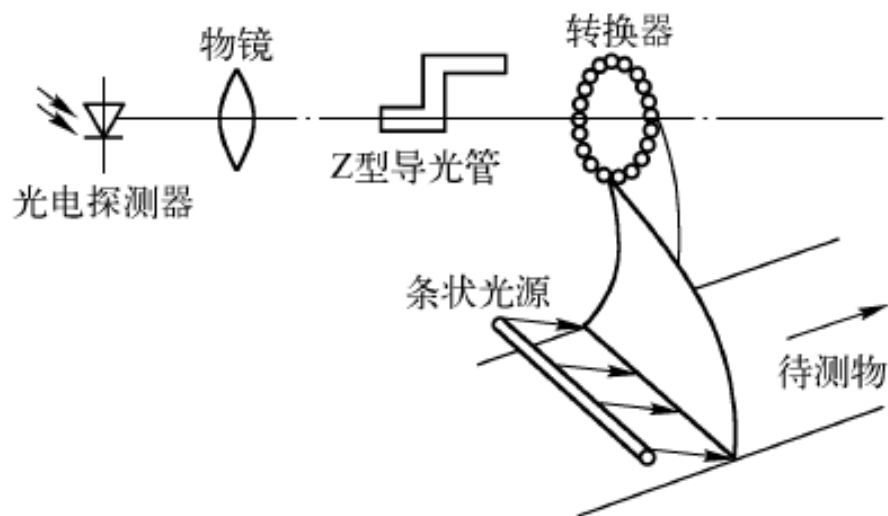


图7-21 光纤束行扫描器原理

4. 光纤直接导光的其他应用

光纤直接导光的例子很多。例如多种光的合成利用光纤比利用光学系统方便得多。又如激光手术刀就是利用光纤传输激光，使激光能量以高入射功率密度($1\sim 10\text{W}$)聚焦在人体某部分组织表面上，辐射为人体组织吸收、升温、最后气化而切除。激光加工、加热，以及海底供能等，采用光纤束传输能量是尚佳的方案。

7.3.3 光纤在传像方面的应用

1. 各种内窥镜

利用光纤传像束可弯曲的特点，可制成各种内窥镜，以实现用一般光学方法难以观察到的地方进行窥视。目前内窥镜在医疗及工业工程中得到了广泛而又满意的应用。

2. 光纤图像转向器

在许多工作场合需要对多处进行切换观察，可采用光纤图像换向系统来实现。如图7-22所示。

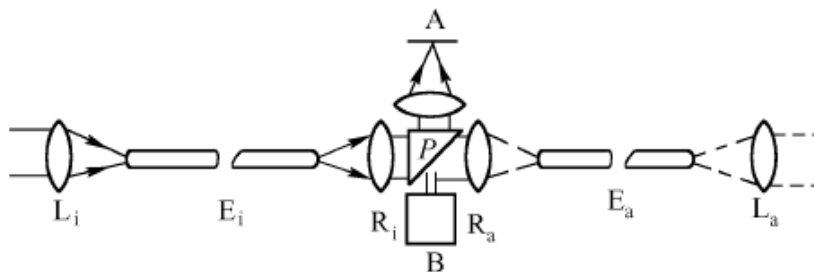


图7-22 光纤图像换向器原理

3. 光纤面板平像场器

这是光纤面板的重要应用之一。在摄影特别是在广角摄影中，要求物镜不产生畸变和场曲。有时很难做到。而利用光纤面板制成校正元件，同时可以校正畸变和场曲。图7-23是一个用来消除场曲的光纤面板平像场器，凹面为输入端。其曲面与物镜像场形状一致，平面为平像场器的输出端。

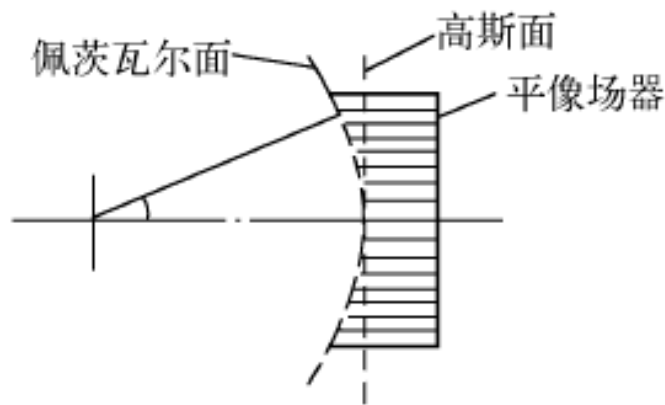


图7-23 消场曲光纤平像场器

4. 光纤面板在真空器件中的应用

在电真空器件中，光纤面板主要是用来充当输入窗口，输出窗口或管内传像器件。在一代像增强器中，它是作为几支单级像增强器(如三支)之间的级间耦合元件。采用光纤面板作为单管的输入和输出窗，使级间直接耦合，将极大地提高光能的利用率。同时光纤面板还可校正电子光学系统产生的场曲。

光纤面板在变像管、阴极射线管和x射线像增强器等器件中的应用与上述类似。

光纤扭像器是将图像旋转 180° 后输出，使倒像转为正像。光纤光锥可使图像放大或缩小，常作为像耦合器件使用。刚性光纤器件在光电成像系统中应用甚广。

7.4 智能光纤传感技术

本节主要包括以下几部分内容：

7.4.1 智能结构

7.4.2 光纤传感器在智能结构中的应用

7.4.3 光纤智能结构的应用

7.4.1 智能结构

智能材料(IntelligentMaterials)是模仿生命系统, 能感知环境变化, 并能实时地改变自身的一种或多种性能参数, 做出所期望的、能与变化后的环境相适应的复合材料或材料的复合。

智能结构(IntelligentStructures)是指把智能材料植入工程结构中, 使工程结构感知和处理信息, 并执行处理结果, 对环境的刺激作出自适应响应, 使离线、静态、被动的检测变为在线、动态、实时、主动监测与控制, 实现增强结构安全、减轻质量、降低能耗、提高结构性能等目标的工程结构。

智能结构分为本征型与集成型两大类。本征型是利用微结构内部具有传感、执行及信号处理功能的材料制成的结构。集成型是指在结构内部埋入传感器、执行器及控制器的结构。

7.4.2 光纤传感器在智能结构中的应用

光纤是智能结构首选的信息传输与传感的载体。

一个光纤智能结构系统的基本功能是：感知结构内、外部环境条件；将信息传送回光电信号处理器；根据感知到的信息作出反应。

光纤智能结构基本框图如图7-24所示。

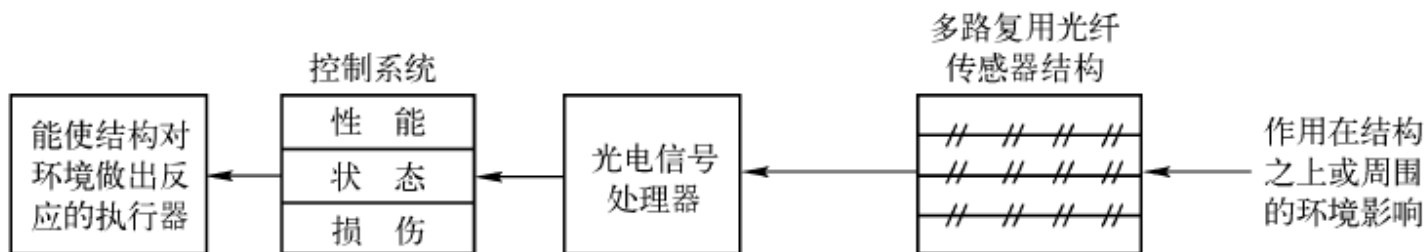


图7-24 光纤智能结构基本框图

与光纤智能结构有关的技术及关系如表7-2所示。

表 7-2 与光纤智能结构有关的技术

光纤智能结构	相 关 技 术
系统结构	状态监测,性能监测,损伤控制
信号处理	电,光,多通道,多传感
多路复用	TDM,WDM,FM,相干,偏振,耦合器,星形
光纤传感器	应变,温度,振动,声,电磁场,转动,加速,构造,兼容性
光纤材料	光纤涂层,联接器,定向,材料,衰减,石墨,环氧树脂,聚酰亚胺,钛,铝,陶瓷,碳-碳

对光纤智能结构而言其中的关键技术之一是光纤传感技术，表7-3所示为一些已经用于光纤智能结构系统的光纤传感器，并对不同类型传感器的应用特点进行了比较。

表 7-3 用于智能结构的代表性光纤传感器

传感器类型	多路复用能力	单光纤结构	单端结构	灵敏度	对短波范围的适应性	埋入10个传感点
Sagnac/Mach-Zehnder	好	不可以	可以	高	低	差
Michelson	好	不可以	可以	高	中	差
Sagnac	好	不可以	不可以	中	低	差
分布式传感器						
Raman	好	可以	可以	低	低	好
Rayling	好	可以	可以	低	低	好
Sagnac/Mach-Zehnder	好	可以	不可以	低	低	好

续表

传感器类型	多路复用能力	单光纤结构	单端结构	灵敏度	对短波范围的适应性	埋入 10 个传感点
Fabry-Perot 干涉仪	好	可以	可以	高	高	好
光纤光栅	好	可以	可以	高	高	好
微弯	好	可以	可以	低、中	低、中	好
双模传感器	差	可以	可以	高	高	差
偏振计	差	可以	可以	高	高	差、中
断裂传感器	差	可以	可以	低、中	高	好

在光纤智能结构中，多路复用技术有5种：分波长复用、分时复用、频分复用、干涉复用和偏振复用。最常用的是分波长复用，其中每个传感器按光谱色彩编码并且分时复用，可以用于空间上分散的传感器。图7-25所示为分时和分波长复用相结合的一个简单例子。

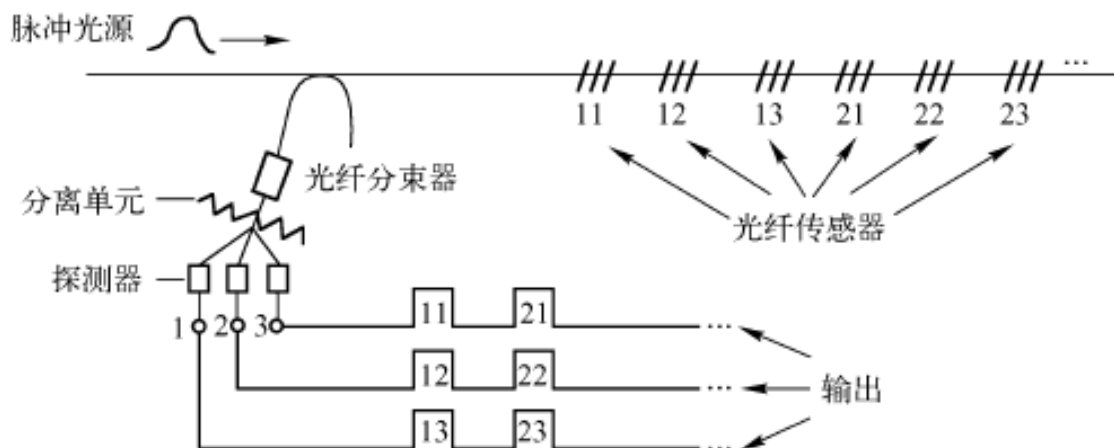


图7-25 使用时间-波长-分割多路复用技术，支持沿一根光纤上的几个光纤传感器

7.4.3 光纤智能结构的应用

1. 航空方面的应用

(1) 飞机骨架健康评估

光纤智能结构使飞机具有自身结构的“自觉性”，即通过埋置在飞机结构件和蒙皮内的光纤传感器，便可获得飞机构件的应力、应变、压力、温度变化等信息。在飞机起飞和动力加大过程中，位于结构或蒙皮中的传感器将采集环境参数，计算机将无损测试构件，评估其飞行价值。

(2) 超高速飞行器

当飞行器的飞行速度超过5倍音速时，飞行器表面的温度已构成敌方红外热探测的热目标。为了飞行器的自身安全，应将其表面温度降至2180C以下，航天飞机X-30就采用复合材料冷却板，在冷却板内埋置光纤传感器，测量复合材料板的健康状况和温度分布的数据，如图7-26所示。此外，还可在冷却板内布设光纤通信线路。

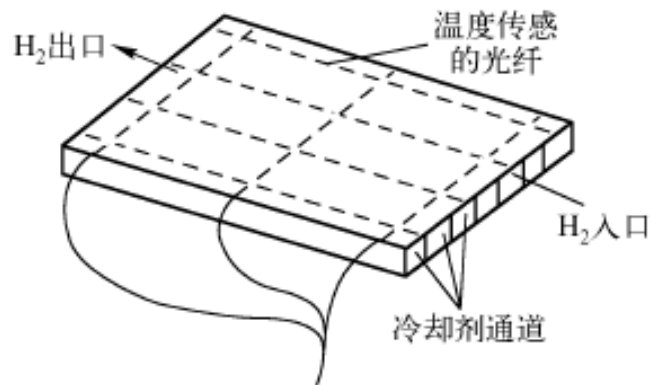


图7-26 航天飞机冷却板

2. 船舶方面的应用

光纤传感器和光纤传输系统具备足以克服各种干扰和恶劣环境的高可靠要求。目前，海军的大部分注意力集中于特种目的声呐阵列和磁异常探测的光纤传感器上，而对用于探测压力，温度、位置、液位、燃烧火焰和破裂等常用的光纤传感器的开发则相对落后。

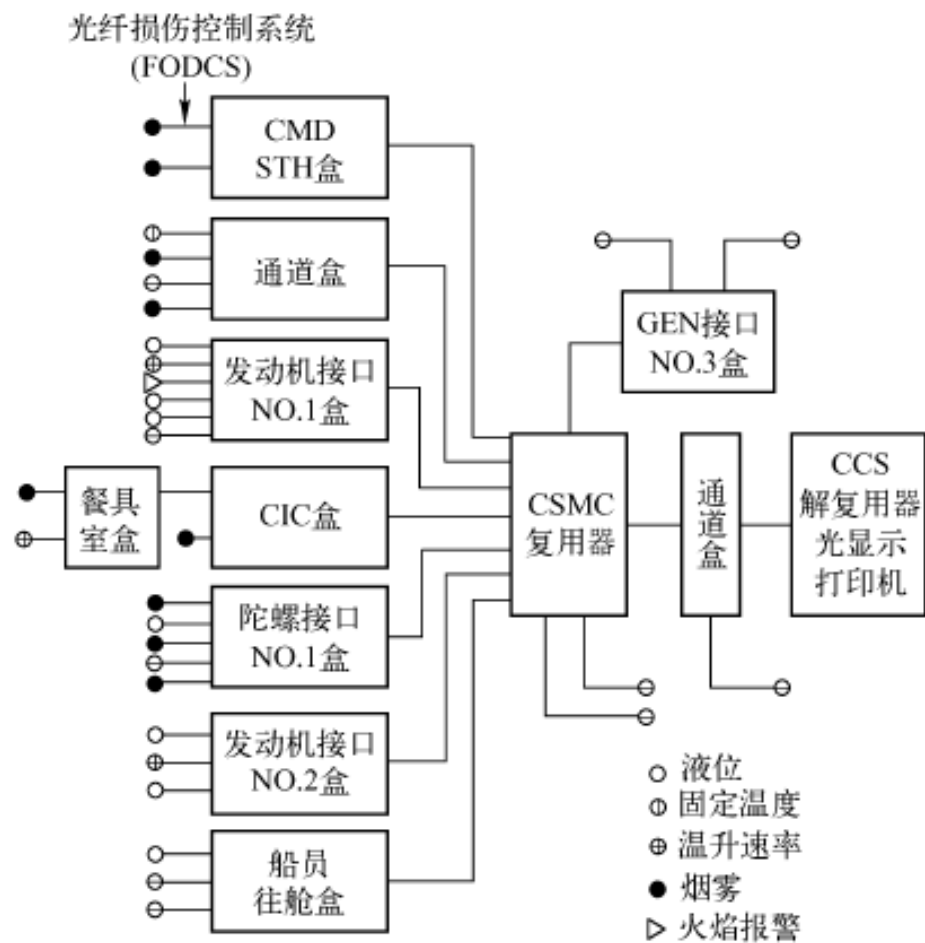


图7-27 安装在USS Mobile Bay号舰上的光纤损伤控制系统

3. 医学方面的应用

表7-4归纳了光纤在医用测量仪器中的主要应用。

表 7-4 光纤在医用测量仪器中的主要应用

医用光纤传感器	用途(诊断和治疗)
内窥镜	胃窥镜、支气管窥镜、膀胱窥镜、心脏窥镜
温度传感器	热理疗、采用释热法的心脏病监护、组织热损伤的检测等
压力传感器	心血排出量、颅内压力、神经病学、泌尿动力学等
化学传感器	新陈代谢与呼吸问题、血和组织含氧量、氧和血红蛋白离解曲线等

(1) 光纤激光多谱勒流速仪

光纤激光多谱勒流速仪用途很多，包括心血管临床病理(心脏监护)、冠状血管扩张照影和冠状动脉狭窄的检测。血管内的血流速度可用光纤耦合的激光多普勒仪来测定，该方法已经在管壁极薄和管径极小的血管内试用过。它是基于由典型直径为 $7\mu\text{m}$ 的运动中的血细胞的散射造成的激光多谱勒频移。如图7-28所示。散射光信号将有一个多普勒频移

$$\Delta f = 2nv/\lambda \cos\theta \quad (7-23)$$

式中 $n(=1.33)$ 为血液的折射率， v 为直流速度， θ 为图7-28所示系统定义的角度。

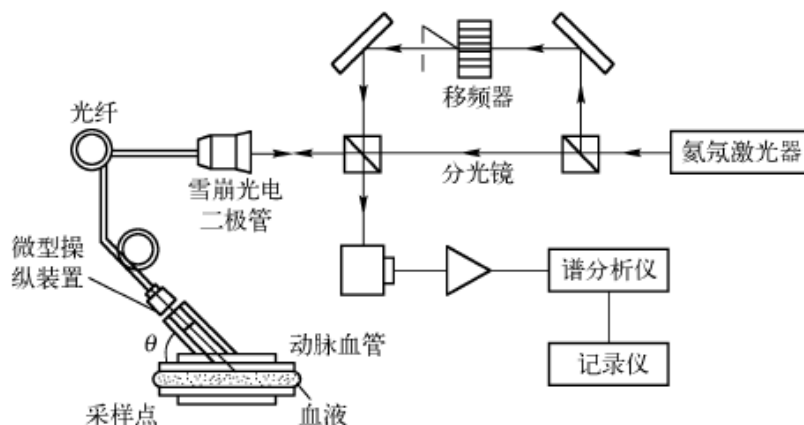


图7-28 光纤激光多谱勒流速仪
(LDV)系统草图

(2) 医用光纤压力传感器

当今的医用光纤压力传感器通常都设计得能放在医用内插套管的端点。操作原理是监测与压敏膜片机械耦合在一起的镜片的运动。反射并耦合进入输出(或接收)光纤的光分布就是用这种方式调制的。已经开发的例子有用于颅内和心血管内压力的监测。然而，它们也可以应用于泌尿神经学和泌尿动力学领域，用于同时监测在生理填注和排泄过程中的膀胱内、尿道内和肛内的压力。

一种典型的光纤压力装置基于一个压力平衡系统(图7-29)覆盖在套管端侧面孔上并且与一个悬臂片镜粘连在一起的防水压敏膜。

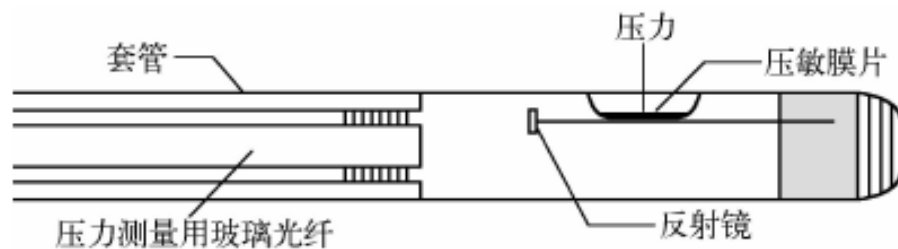


图7-29 医用光纤压力传感器探头

还有一种设计较新的机械式光纤压力传感器如图7-30所示。这种装置依据的是膜片曲率而不是膜片位移。

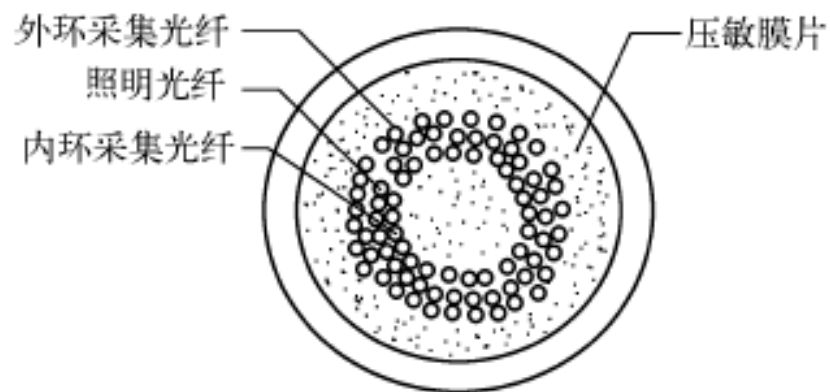


图7-30 医用光纤压力传感器
探头

7.5 光纤传感器及其应用

本节主要包括以下几部分内容：

7.5.1 光纤传感器的优点及类型

7.5.2 光强调制型光纤传感器

7.5.3 相位干涉型光纤传感器

7.5.4 偏振态型光纤传感器

7.5.1 光纤传感器的优点及类型

光纤传感器的优点：

- (1) 光纤传感器的电绝缘性能好，表面耐压可达 $4\text{kV} / \text{cm}$ ，且不受周围电磁场的干扰。
- (2) 光纤传感器的几何形状适应性强。由于光纤所具有的柔性，使用及放置均较为方便。
- (3) 光纤传感器的传输频带宽，带宽与距离之积可达 $30\text{MHz km} \sim 10\text{GHz km}$ 之多。
- (4) 光纤传感器无可动部分、无电源，可视为无源系统，因此使用安全，特别是在易燃易爆的场合更为适用。
- (5) 光纤传感器通常既是信息探测器件，又是信息传递器件。
- (6) 光纤传感器的材料决定了它有强的耐水性和强的抗腐蚀。
- (7) 由于光纤传感器体积小，因此对测量场的分布特性影响较小。
- (8) 光纤传感器的最大优点在于它们探测信息的灵敏度很高。

光纤传感器的分类:

按照在检测中所起的作用分类, 光纤传感器可分为功能性传感器, 即光纤本身既是传输介质又是传感器; 以及非功能性传感器, 即光纤只是信息传输介质, 而传感器要采用其它元件。

按采用光纤传播模式分类, 有单模光纤传感器和多模光纤传感器两类。

按传感器的变化特性分类, 目前常用的有光强型光纤传感器、相位型光纤传感器和偏振态型光纤传感器等。

7.5.2 光强调制型光纤传感器

1. 光纤辐射计

这里辐射是指射线辐射。光纤辐射计利用，射线 x 或 y 射线照射下产生着色中心，改变光纤对光的吸收特性而制成的仪器，其工作原理如图7-31所示。

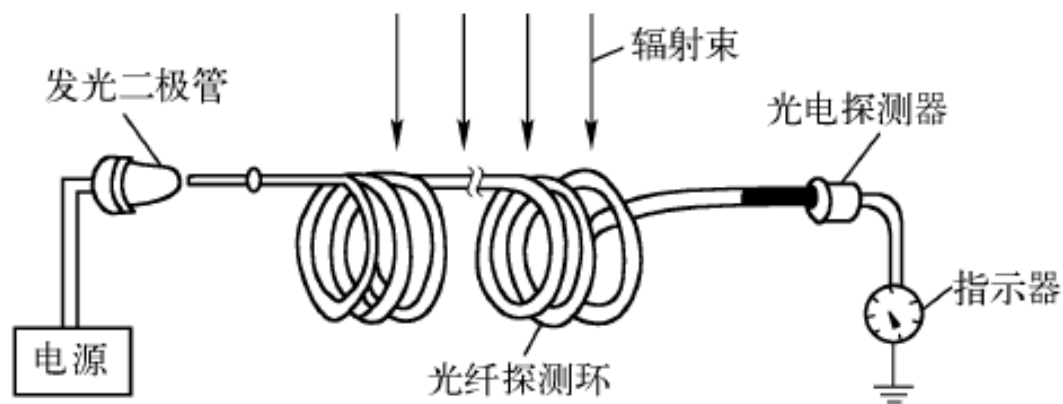


图7-31 光纤辐射计原理

2. 改变光纤折射率的光纤温度传感器

光强型光纤温度传感器是利用温度变化引起光纤芯料和皮料的折射率发生变化，由于它们的变化规律不同，造成两者的折射率差发生变化，从而使得芯、皮界面处全反射临界角 i_0 发生变化。当 i_0 增大时，可使光纤传输漫射光的透射比增大；反之，因温度变化使 i_0 减小时，光纤对传输的漫射光由皮料输出较多，而减少了光纤的透射比。当输入光稳定，按输出光通量的大小就可测定折射率差的变化，相应测出温度的变化，达到测量温度的目的。

3. 光纤位移传感器

利用改变光纤的微弯状态，可实现对光强的调制。图7-32是利用光纤微弯效应测定光纤位移传感器的原理图。

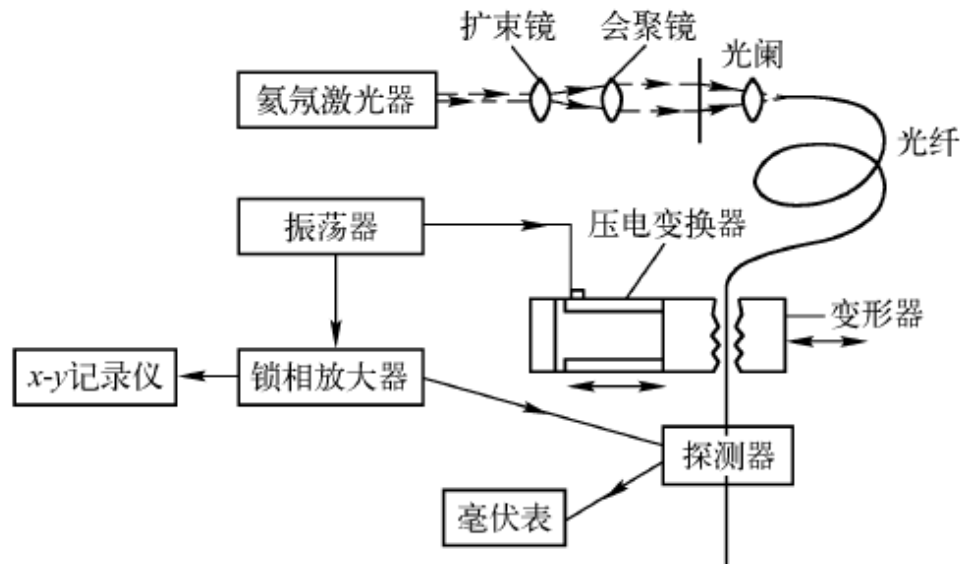


图7-32 光纤位移传感器

7.5.3 相位干涉型光纤传感器

相位干涉型光纤传感器是利用外界因素变化引起光纤中传导光的相位变化，通过测定相位差，获得待测物理量的信息。

它的主要特点如下：

(1)灵敏度高。利用光束间相位差形成干涉的技术是目前已知检测技术中最灵敏的方法之一。因此相位干涉型光纤传感器也具有极高的灵敏度。

(2)应用灵活。各种物理量只要使光纤中传输光的光程发生变化，就可以实现传感信息的检测。

(3)对光的质量要求高。由于要使光束间产生干涉，经光纤传输出的光束之间一定要满足相干条件。

1. 马赫—曾特尔光纤干涉仪

它利用马赫—曾特尔型干涉原理制成，即利用分振幅法，产生独立的双光束，并实现干涉的仪器。马赫—曾特尔光纤干涉仪的基本工作原理如图7-33所示。

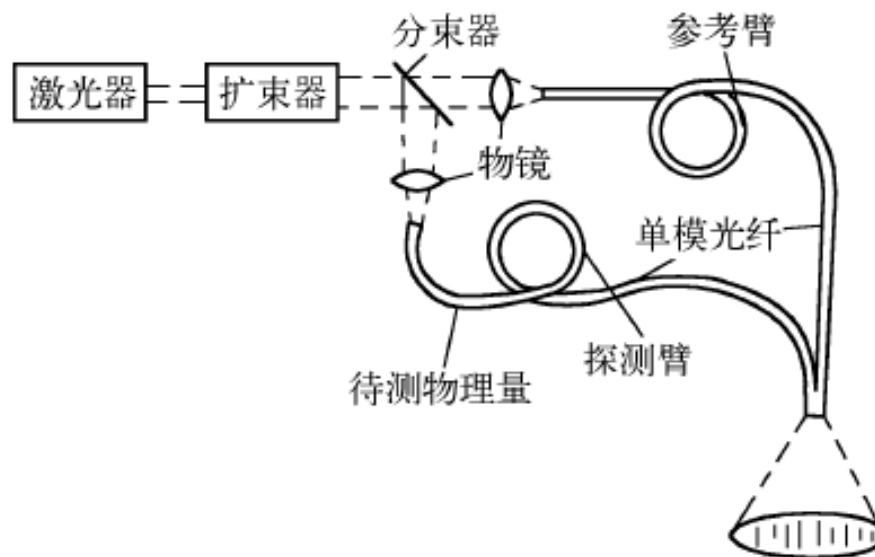


图7-33 马赫—曾特尔光纤干涉仪

(1)作为压强传感器

光纤干涉仪的探测臂在外界压强作用下，产生应力使光纤的折射率和长度发生改变，造成光程变化，从而使所传光束的相位发生变化。其关系为

$$\frac{\Delta\phi}{PL} = -\frac{\beta(1-u)}{E} + \frac{\beta n^2}{2E}(1-2u)(2\rho_{12} + \rho_{11}) \quad (7-24)$$

式中， $\Delta\phi$ 为光纤中光波相位的变化量； P 为待测压强； L 为光纤的长度； β 为光纤单模传播常数； u 为光纤的泊松系数； E 为光纤的杨氏弹性模量； ρ_{11} 、 ρ_{12} 为弹光系数；

(2)作为温度的传感器

当光纤干涉仪探测臂的温度不同于参考臂时，探测光纤的折射率 n 、长度 L 和直径 d 都会发生变化，其中直径变化较小可以忽略。这些变化造成两光束相位差为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta nL + n\Delta L) \quad (7-25)$$

单位长度、单位温度变化所产生的相位差为

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta TL} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\Delta n}{\Delta T} + \frac{n\Delta L}{\Delta TL} \right) \quad (7-26)$$

2. 法布里—白洛光纤干涉仪

它是利用法布里—白洛干涉型的原理，即多束光干涉原理和光纤导光功能所构成。采用单根光纤，将两端面抛光并镀以反射膜，这样就形成了由两端面组成的双镜面腔，由出射端发出的多束光中每相邻两束光间的光程差为 $\Delta=2Ln$ ，式中 n 为纤芯折射率， L 为光在光纤中单向一次传播的几何距离。对应的相位差为 $\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{4\pi Ln}{\lambda}$ 。当有外界物理量的变化作用于光纤时，将引起光纤中光程的变化，使之附加了对应的相位差。使多束光干涉条纹产生变比，接收并记录这些信息就反映了外界物理量的变化。法布里—白洛光干涉仪的原理如图7-34所示。

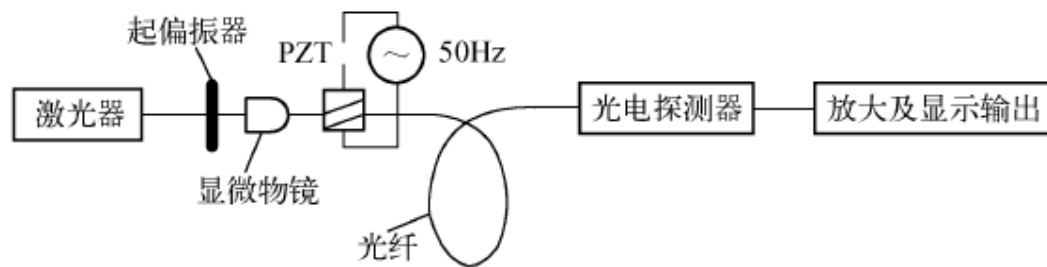


图7-34 法布里—白洛光纤干涉仪原理

3. 塞内光纤干涉仪

它是利用沿着同一光纤反向传输的两束光，在外界因素的作用下，产生不同的相位移，通过干涉技术把由于外界因素的变化而引起的这种相位变化检测出来。

它的典型应用是角速度传感器——光纤陀螺。用单模光纤绕成圆环形光纤线圈。当光纤线圈以角速度 ω 旋转时，按照塞内效应相反方向传输的两束光间产生的相位差 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = (8\pi NA / \lambda c) \omega \quad (7-27)$$

式中， N 为光纤线圈的圈数； A 为每圈光纤所围的面积； c 为光速； λ 为光纤所传输光在真空中的波长。图7-35所示为带相移的光纤陀螺原理图。

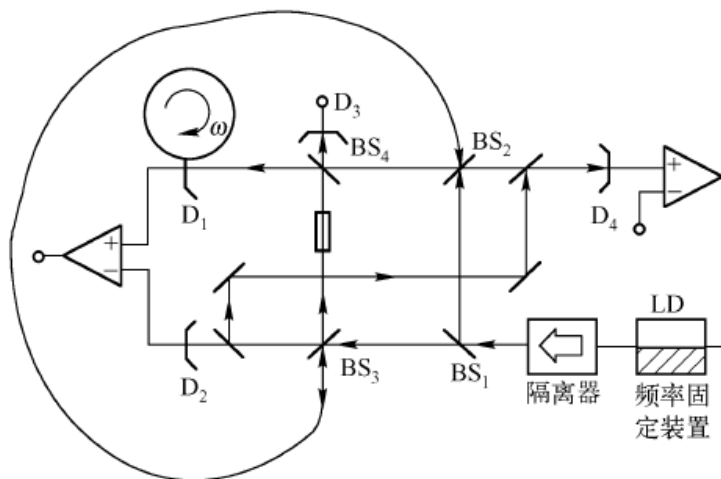


图7-35 带相移的光陀螺纤

4. 单光纤偏振干涉仪

光纤双臂干涉仪结构的一大缺点是难以克服外界因素对参考臂的干扰。为克服这一缺点发展了单光纤偏振干涉仪，采用单根具有高双折射的单模光纤，利用传递中两正交偏振光在外界因素影响下相位变化不同的特点，通过这两束光的干涉完成对待测量的传感。

利用该原理制成的温度传感装置如图7-36所示。

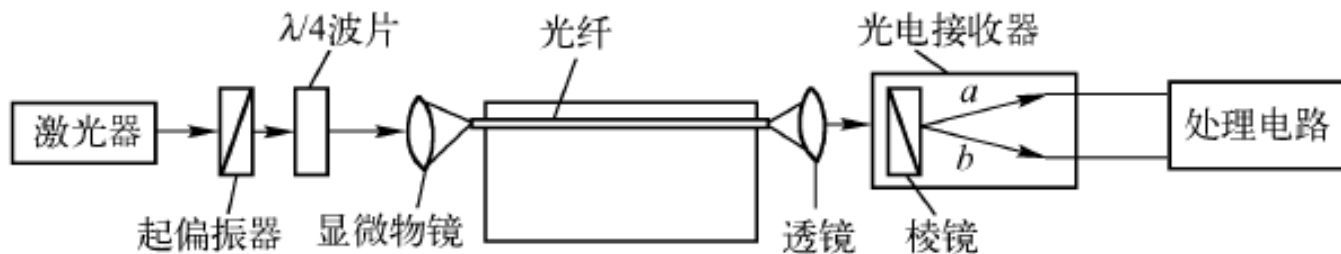


图7-36 单光纤偏振干涉仪

当有温度等外界物理量变化作用于光纤时，引起双折射率差变化造成新的附加相位差 $\Delta\varphi$

$$\frac{1}{L} \frac{d(\Delta\varphi)}{dT} = \frac{K_0}{L} \left[L \frac{\Delta n}{n} \frac{dn}{dT} + \Delta n \frac{dL}{dT} + L \frac{\Delta n(T)}{T - T_s} \right] \quad (7-28)$$

式中， K_0 为与系统有关的常数； $\Delta n(T)$ 为温度 T 的变化所产生的折射率 n 的变化； T_s 为光纤初始温度； T 为待测温度场的温度。

实际测量中将光纤输出的两偏振光经透镜6后再由渥拉斯顿棱镜7分解出两振动方向垂直的偏振光 a 、 b ，经光电接收器8接收，其强度为 E_1 和 E_2 ，可以导出待测温度 T 与 E_1 和 E_2 的关系

$$(E_1 - E_2) / (E_1 + E_2) = \cos \varphi(T) \quad (7-29)$$

式中 $\varphi(T) = [d(\Delta\varphi) / dT](T - T_s)$

7.5.4 偏振态型光纤传感器

它是利用某些外界物理量的变化，引起光纤中传输的偏振光的偏振态变化的原理所构成。光纤偏振态对电流敏感的基本原理是利用熔融石英光纤材料的法拉弟旋光效应。电流产生的磁场使光纤中偏振光振动面发生旋转，其转角 θ 与电流 I 之间的关系为：

$$\theta = VLI / 2\pi R \quad (7-30)$$

式中， V 为材料的费尔德常数； L 为线圈与光纤间的作用长度； R 为线圈的半径。

光纤电流传感器的装置原理如图7-37。光纤输出的偏振光经渥拉斯顿棱镜分成两束偏振光，其强度为 E_1 、 E_2 ，在旋转角不大的条件下

$$B = (E_1 - E_2) / (E_1 + E_2) \quad (7-31)$$

式中， $B = \sin 2\theta$ ，所以有

$$I = \frac{\pi R (E_1 - E_2)}{VL (E_1 + E_2)} \quad (7-32)$$

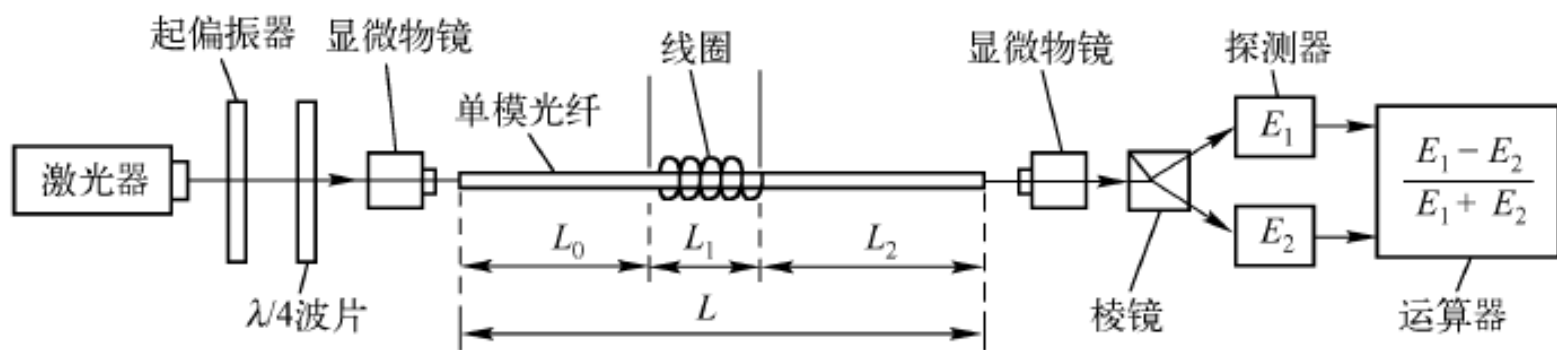


图7-37 光纤电流传感器

7.5.5 分布式光纤传感原理

所谓分布调制，就是外界信号场(被测场)以一定的空间分布方式对光纤中的光波进行调制，在一定的测量域中形成调制信号谱带，通过检测(解调)调制信号谱带即可测量出外界信号场的大小及空间分布。分布调制分为本征型和非本征型两类。非本征型分布又称准分布式，实际上是多个分布式光纤传感器的复用技术。

1. 准分布式光纤传感的原理

准分布式光纤传感的基本原理是，将呈一定空间分布的相同调制类型的光纤传感器耦合到一根或多根光纤总线上，通过寻址、解调，检测出被测量的大小即空间分布，光纤总线仅起传光作用。根据寻址方式的不同，可以分为时分复用(TDM)、波分复用(WDM)、频分复用(FDM)、偏分复用(PDM)、空分复用(SDM)等几类，其中时分复用、波分复用和空分复用技术较成熟，复用的点数较多。多种不同类型的复用系统还可组成混合复用网络系统。

(1) 时分复用(TDM)

时分复用靠耦合于同一根光纤上的传感器之间的光程差，即光纤对光波的延迟效应来寻址。时分复用系统如图7-38所示。

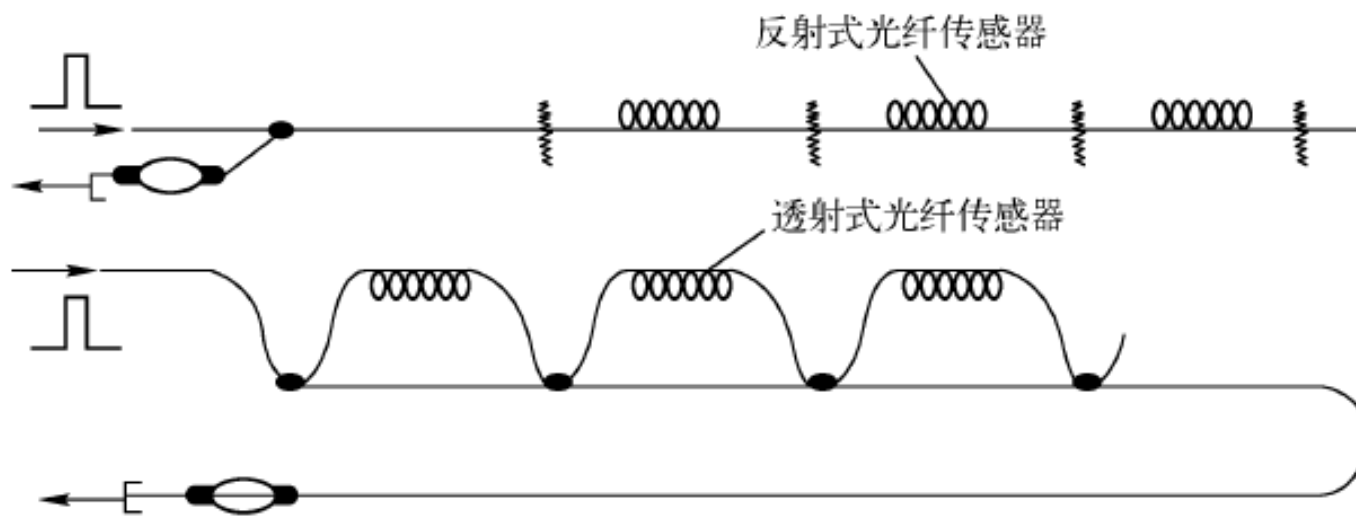


图7-38 时分复用示意图

(2) 波分复用(WDM)

波分复用通过光纤总线上各传感器的调制信号的特征波长来寻址。一种比较典型的波分复用系统如图7-39所示。

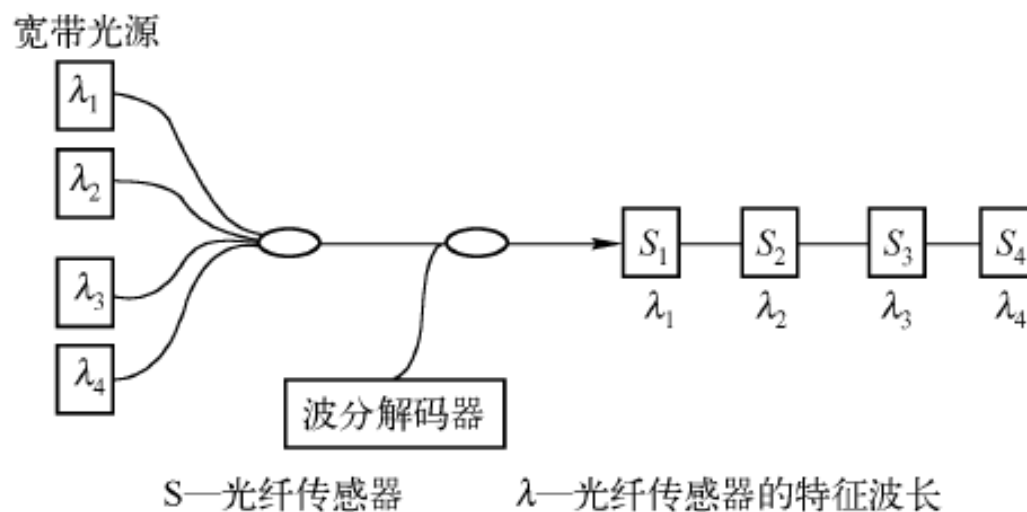


图7-39 波分复用示意图

(3) 频分复用(FDM)

频分复用是将多个光源调制在不同的频率上，经过各分立的传感器汇集在一根或多根光纤总线上，每个传感器的信息即包含在总线信号中的对应频率分量上。图7-40为频分复用的一种典型结构。

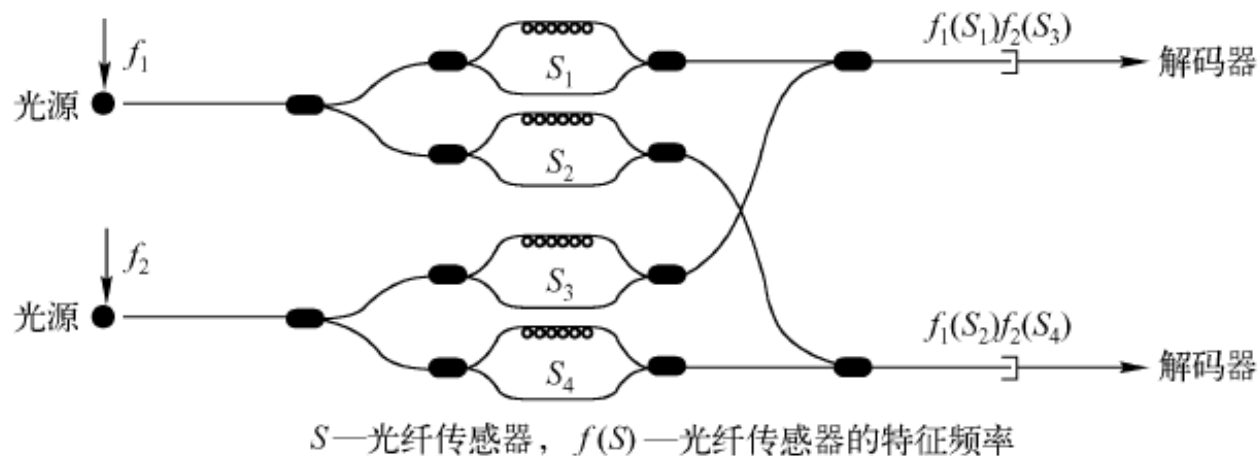


图7-40 频分复用示意图

(4) 空分复用(SDM)

空分复用是将各传感器的接收光纤的终端按空间位置编码，通过扫描机构控制选通光开关选址，其示意图如图7-41所示。

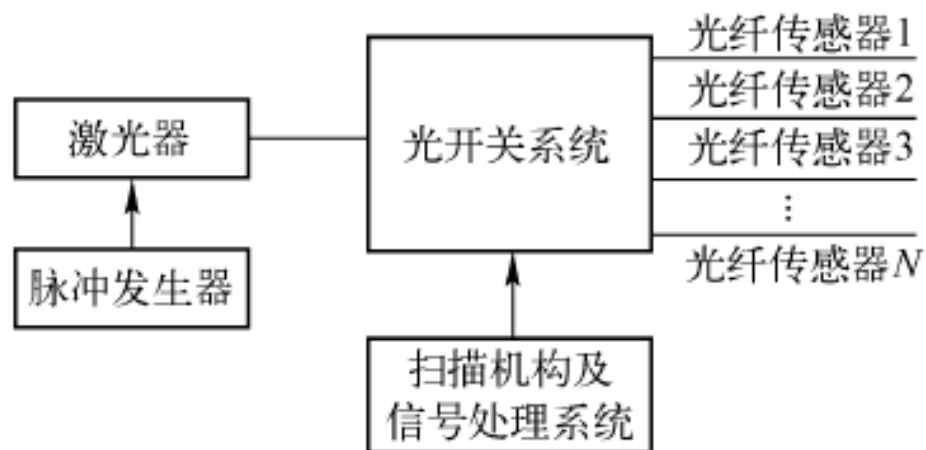


图7-41 空分复用示意图

2. 分布式光纤传感原理

(1) 时域分布式光纤传感系统

时域分布式光纤传感系统的技术基础是光学时域反射技术OTDR。OTDR是一种光纤参数的测量技术，也是光时域反射计的简称，其基本原理是利用分析光纤中后向散射光或前向散射光的方法测量因散射、吸收等原因产生的光纤传输损耗和各种结构缺陷引起的结构性损耗，通过显示损耗与光纤长度的关系来检测外界信号场分布于传感光纤上的扰动信息。一种基于检测后向散射光的OTDR如图7-42所示。

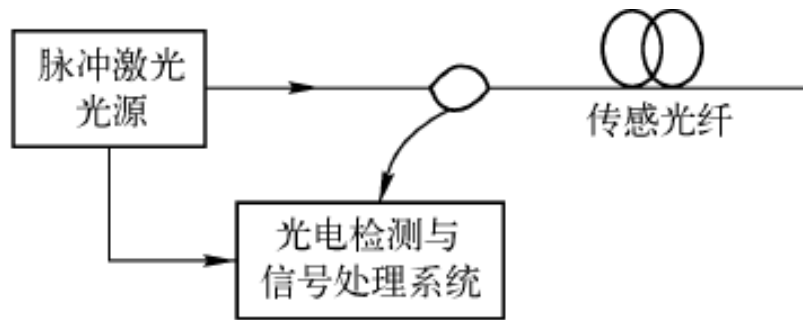


图7-42 OTDR示意图

(2) 波域分布式光纤光栅传感原理

波域分布式光纤光栅传感系统如图7-43所示。在一根传感光纤上制作许多个布喇格光栅，每个光栅的工作波长互相分开，经3dB耦合器输出反射光后，用波长探测解调系统测出每个光栅的波长或波长偏移，从而检测出相应被测量的大小和空间分布。

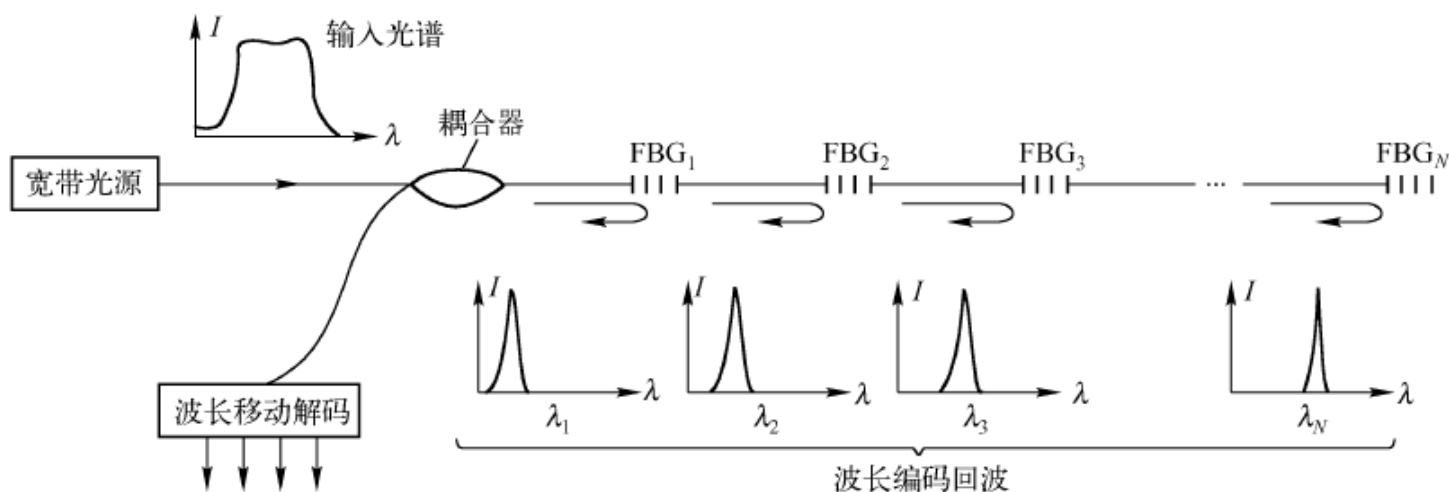


图7-43 波域分布式光纤光栅传感系统示意图

3. 分布式光纤传感器

分布式传感器是指能同时测量空间多个点的环境参数，甚至能测量空间连续分布的环境参数。

分布式光纤传感器是将传感光纤沿场排布，并采用独特的检测技术，对沿光纤传输路径上场的空间分布和随时间变化的信息进行测量或监控，其原理如图7-44所示。

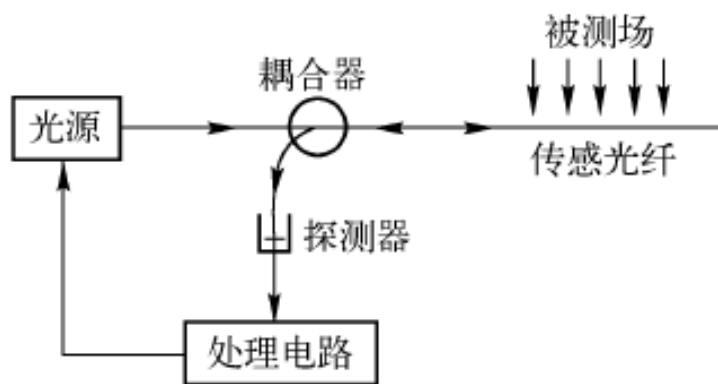


图7-44 分布式光纤传感器原理框图

7.5.6 用于构成分布式光纤传感器的主要技术

1. 反射法

反射法是利用光纤在外部扰动作用下产生的瑞利(Reyleigh)散射、拉曼(Raman)散射、布里渊(Brillouin)散射等效应进行测量的方法。

(1)光时域反射(OTDR)法

OTDR技术在分布式光纤传感技术中得到了广泛应用，其原理如图7-45所示。把一个能量为 E_0 ，宽度为 ΔT ，光频率为 f 的矩形光脉冲耦合进光纤。

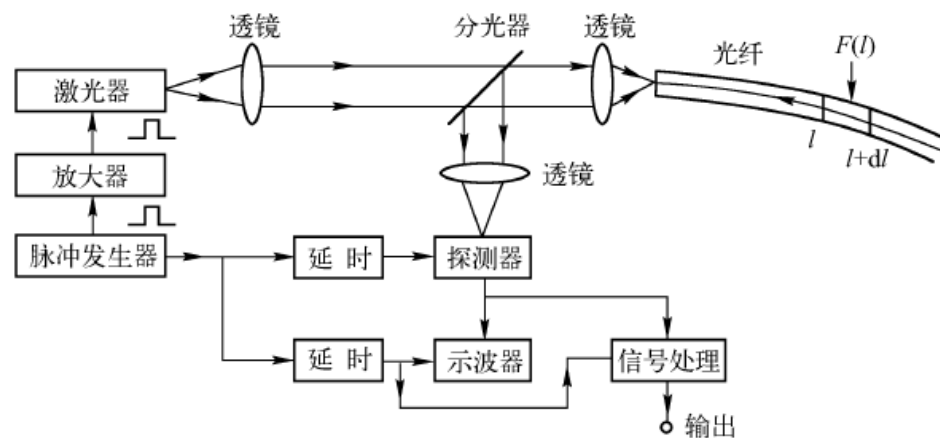


图7-45 OTDR系统原理图

(2) 偏振光时域反射(POTDR)法

POTDR技术中使用了后向散射光的强度信息，而POTDR法是利用后向散射光的偏振态信息进行分布式测量的技术。

光纤在外部扰动的影响下，光纤中光的偏振状态发生变化，检测偏振状态的变化，就能得到外部扰动的大小和位置。图7-46是POTDR法的基本原理图。

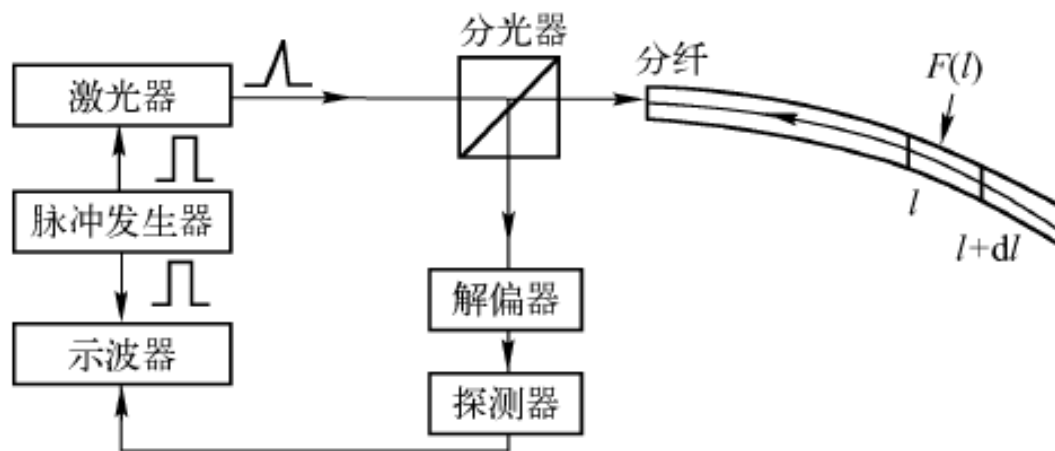


图7-46 POTDR系统原理

2. 波长扫描(WLS)法

波长扫描法是Chojilzki等人于1991年提出的一种新方案。该方法用白光照射保偏光纤，运用快速傅里叶(Fourier)算法来确定模式耦合系数的分布，图7-47为其原理图。

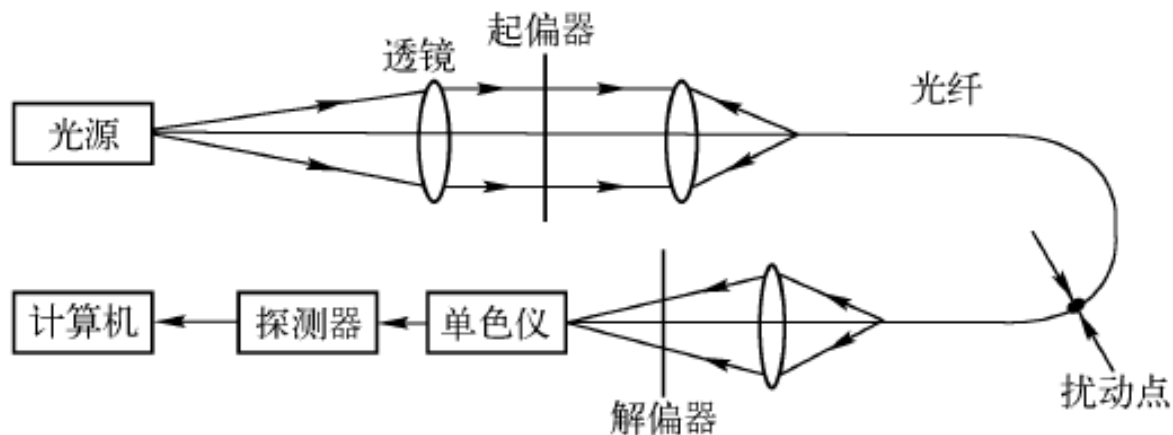


图7-47 WLS系统原理图

3. 干涉法

干涉法是利用各种形式的干涉仪或干涉装置把被测量对干涉光路中光波的相位调制进行解调，从而得到被测量信息的方法。干涉型光纤传感器的最大特点是检测灵敏度非常高，使用普通的技术却可得到高性能

以外差式干涉法为例，如图7-48的原理图。

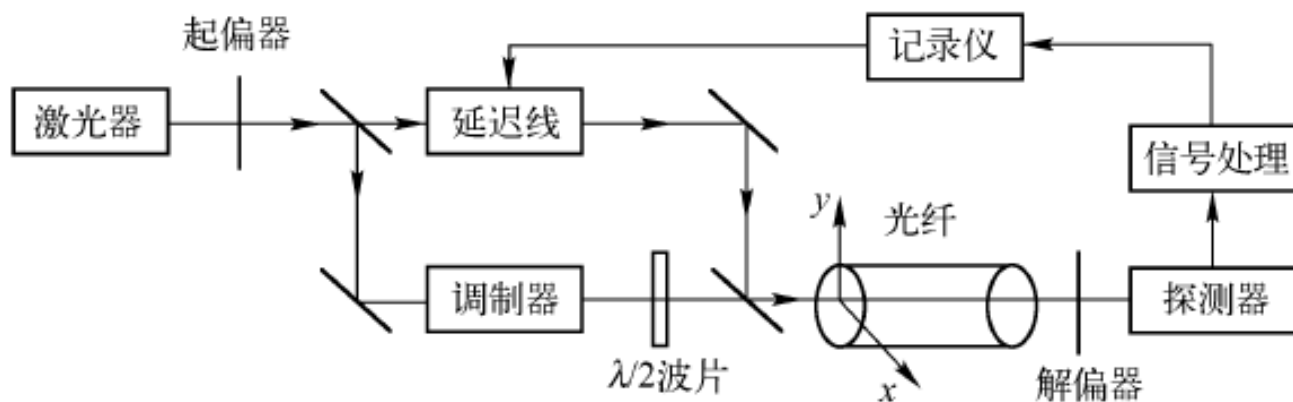


图7-48 差式干涉原理图

4. 连续波调频(FMCW)法

该方法属于光频域反射(OFDR)技术。FMCW法是第一种使用前向传输光进行分布式测量的方法。图7-49是其原理图。

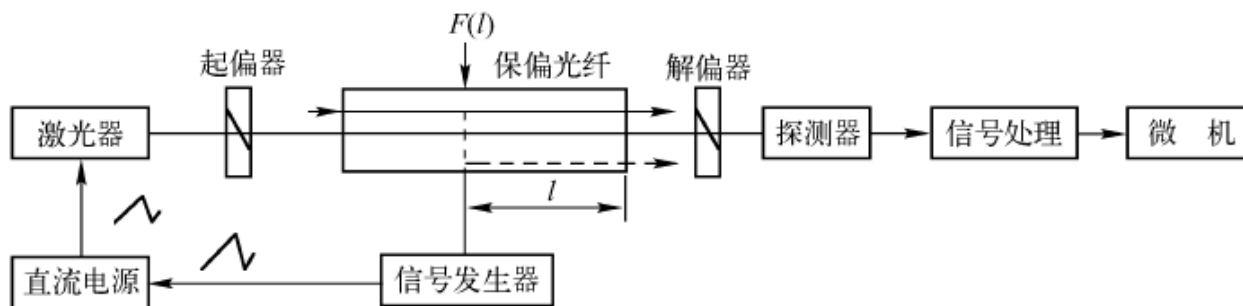


图7-49 FMCW系统原理图

7.5.7 其它光纤传感器及应用

前面介绍的主要是功能性光纤传感器的分类和一些实用例子。此外，还有单纯作光信号传输，而不起敏感作用的传光型非功能性传感器，待测量的传感要依靠其它元件来完成。图7-50所示为利用半导体晶体作温度变换传感器的测温头。

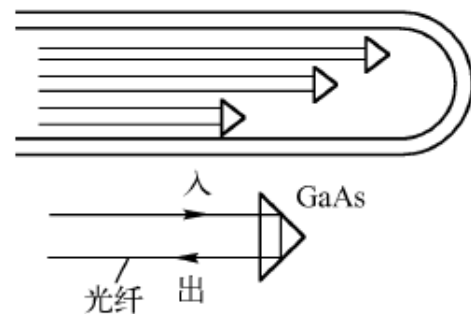


图7-50 半导体晶体测温头

新型光纤高温计在国内也进行了不少研究工作。如图7-51为利用双色检测高温的原理图。

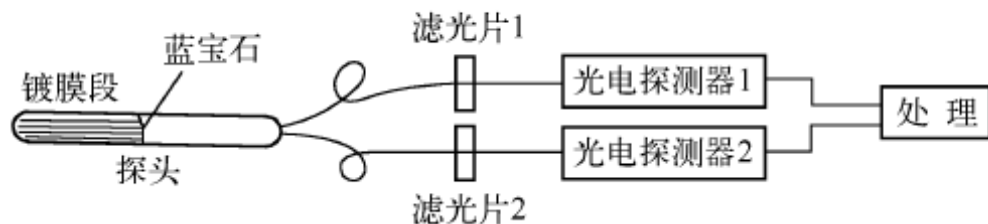


图7-52 光纤速度传感器

光纤传感器与其它物理效应相结合又可在很大程度上扩展其使用范围。如利用多普勒效应与光纤传感器相结合制成的光纤速度传感器。它可用来测定气体或液体的流速，如人体血管内血液的流速、飞机翼面或船舶侧面流体的流速，以及许多难以用一般方法测速的场合均可采用这一方法。工作原理如图7-52所示。

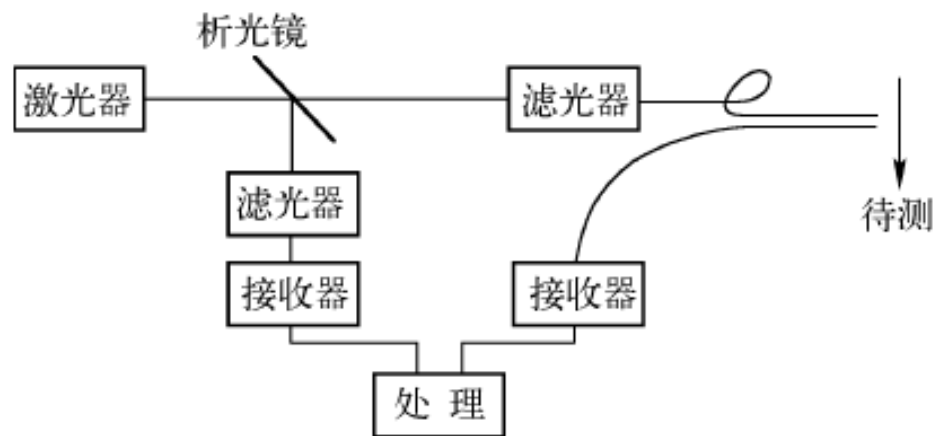


图7-52 光纤速度传感器