



第七章 薄膜的物理性质

□ 7.3 薄膜的光学性质

7.3.1 薄膜光学的基本理论

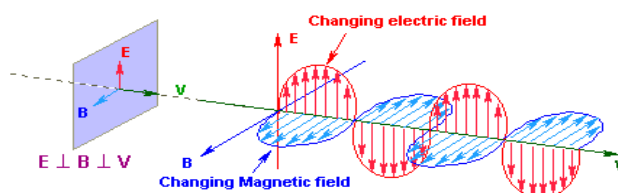
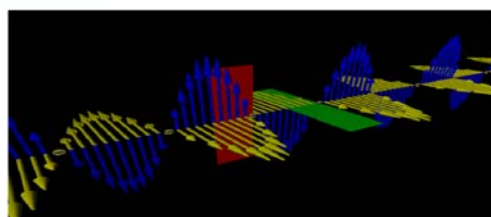
7.3.2 薄膜光学性能的测试

7.3.3 薄膜波导与光耦合



7.3.1 薄膜光学的基本理论

光波是一种电磁波，在三维空间中的传播可以用电矢量 E 和磁矢量 H 来描述





7.3.1 薄膜光学的基本理论

对于波长为 λ 的单色平面波，若沿给定的方向余弦 (α, β, γ) 传播，则电矢量的波动方程为

$$\vec{E} = E_0 \exp \left\{ i \left[\omega t - \frac{2\pi n}{\lambda} (ax + \beta y + \gamma z) \right] \right\}$$

式中， ω 是光振动的角频率， n 是介质的折射率。



7.3.1 薄膜光学的基本理论

1. 反射定律和折射定律

反射定律： $\theta_0 = \theta_r$ (1.1-1a)

折射定律： $n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1$ (1.1-1b)

已知界面两侧物质的折射率及入射角，就可由折射定律求出折射角。

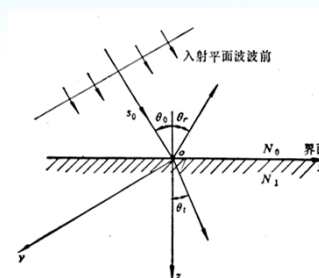


图1-3 平面波的反射和折射

折射定律对于透明或吸收的介质都同样适用。

对于吸收性媒质，只要把介电常数或折射率看成复数 $n^* = n - ik$



7.3.1 薄膜光学的基本理论

2、反射率和透射率

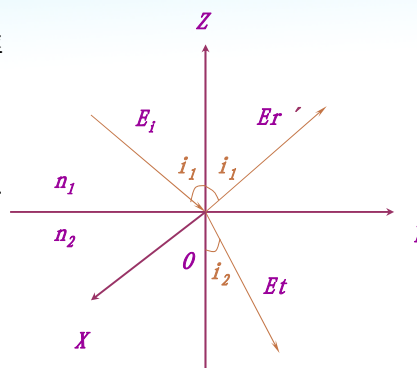
薄膜的光学性能常常用薄膜的反射率和透射率来表示。

光波入射到两种介质面上，此时反射率R和透射率T分别为：

$$R = \frac{E_r}{E_i} \quad T = \frac{E_t}{E_i}$$

式中， E_i, E_r, E_t 分别表示入射光、反射光、透射光的**能量**。

电磁波的传播也是能量的传播。在只比较光强的大小(相对值)时，可以用振幅的平方来表征光强(用I表示)。



7.3.1 薄膜光学的基本理论

菲涅耳公式

从电磁场的边界条件出发，可以得到反射和折射定律，以及入射与反射、折射的振幅关系——解决光在界面上的强度分配问题。

- * **研究该问题的基本思路**：可以把入射波电场的振幅矢量分解成两个分量，一个分量垂直于入射面，称为“s”分量；另一个分量位在入射面内，称为“p”分量。
- * **根据叠加原理**：可以只研究入射波电场仅含s分量和仅含p分量这两种特殊情况；当两种分量同时存在时，则只要先分别计算由单个分量所造成的折、反射波电场，然后再作矢量相加即可得到结果。



7.3.1 薄膜光学的基本理论

把电矢量分成两个分量:

p分量——平行于入射面

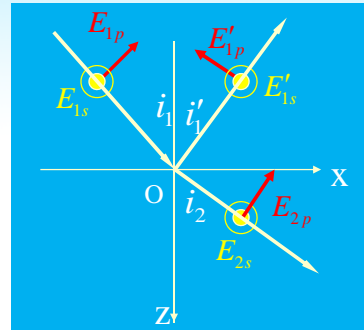
(光线方向与界面法线所确定的平面, 如图中 xy 面为界面, z 轴为法线。)

s分量——垂直于入射面。

图中的 y 轴方向。

规定 s 分量的正方向为沿 y 轴正方向, p 分量的正方向为与 s 分量和传播方向构成右手螺旋关系:

$$\hat{p} \times \hat{s} = \hat{k}$$



对于 s 分量, 设:

$$\begin{aligned}\vec{E}_{1s} &= \vec{y}_0 \cdot A_{1s} \exp[i(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega_1 t)] \\ \vec{E}_{1s}' &= \vec{y}_0 \cdot A_{1s}' \exp[i(\vec{k}_1' \cdot \vec{r} - \omega_1' t)] \\ \vec{E}_{2s} &= \vec{y}_0 \cdot A_{2s} \exp[i(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega_2 t)]\end{aligned}$$



7.3.1 薄膜光学的基本理论

- 菲涅耳给出在分界面处, 入射波、反射波、折射波的 s 分量的振幅关系为:

$$r_s = \frac{A_{1s}'}{A_{1s}} = \frac{\sin(i_2 - i_1)}{\sin(i_2 + i_1)}$$

s 分量的振幅反射率

$$t_s = \frac{A_{2s}}{A_{1s}} = \frac{2 \sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2)}$$

s 分量的振幅透射率

- 同理可得出在分界面处, p 分量的振幅关系。

$$r_p = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)}$$

p 分量的振幅反射率

$$t_p = \frac{2 \sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2) \cos(i_1 - i_2)}$$

p 分量的振幅透射率



7.3.1 薄膜光学的基本理论

则在界面上能流反射率 $\mathcal{R}_s = |r_s|^2 = \frac{\sin^2(i_2 - i_1)}{\sin^2(i_2 + i_1)}$ 和透射率分别为:

$$\mathcal{T}_s = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{\cos i_2}{\cos i_1} |t_s|^2 = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} \cdot \frac{\cos i_2}{\cos i_1} \cdot \frac{4 \sin^2 i_2 \cos^2 i_1}{\sin^2(i_1 + i_2)}$$

所以,

$$\mathcal{R}_s + \mathcal{T}_s = \frac{\sin^2(i_2 - i_1)}{\sin^2(i_2 + i_1)} + \frac{\sin i_1}{\sin i_2} \cdot \frac{\cos i_2}{\cos i_1} \cdot \frac{4 \sin^2 i_2 \cos^2 i_1}{\sin^2(i_1 + i_2)} = 1$$

可见, s分量能量守恒; 同理可得, p分量能量守恒。所以, 菲涅耳公式满足能量守恒。



7.3.1 薄膜光学的基本理论

p分量

$$R_p = \frac{\tan^2(i_1 - i_2)}{\tan^2(i_1 + i_2)}$$

$$T_p = \frac{n_1 \cos i_2}{n_0 \cos i_1} \cdot \frac{4 \sin^2 i_2 \cos^2 i_1}{\sin^2(i_1 + i_2)}$$



7.3.1 薄膜光学的基本理论

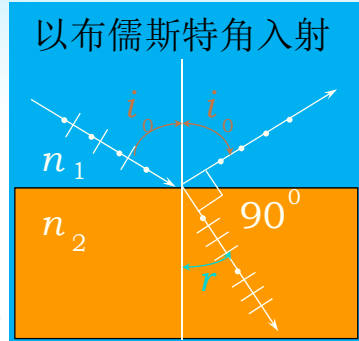
反射和折射产生的偏振

布儒斯特定律

当 $i_2 + i_1 = \pi/2$ 时，

$$\tan(i_2 + i_1) \rightarrow \infty$$

P光的反射系数: $R_p = \frac{\tan(i_2 - i_1)}{\tan(i_2 + i_1)} = 0$



由折射定律: $i_0 + r = 90^\circ$ $R_p = |r_p|^2 = 0$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i_0}{\sin r} = \frac{\sin i_0}{\sin(90^\circ - i_0)} = \tan i_0$$

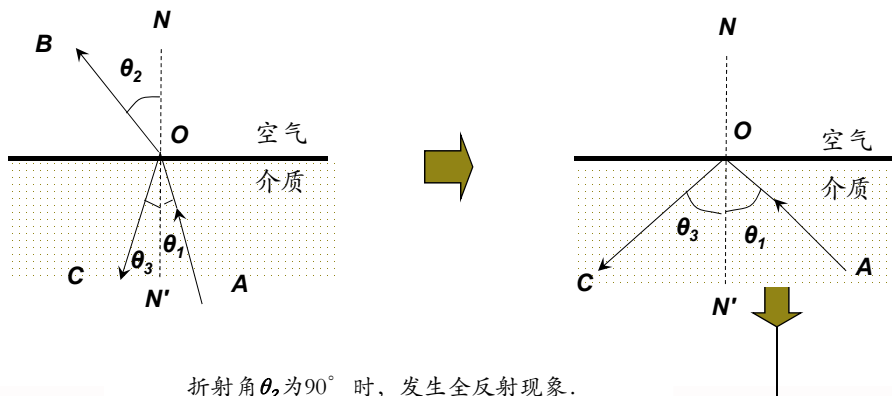
把满足上式并使 $r_p = 0$ 的 i_0 叫做布儒斯特角。



7.3.1 薄膜光学的基本理论

全反射

光由光密介质射入光疏介质时，同时发生反射和折射，折射角大于入射角，随着入射角的增大，反射光线越来越强，折射光线越来越弱，当折射角增大到 90° 时，折射光线完全消失，只剩下反射光线，这种现象叫做全反射。



折射角 θ_2 为 90° 时，发生全反射现象。



7.3.1 薄膜光学的基本理论

全反射

如果光波从光密介质射向光疏介质 $n_1 < n_0$ ，根据折射定律，当

$$\sin i_2 = 1 \quad \text{即} \quad i_2 = \frac{\pi}{2}$$

所有的光全部反射回第一媒质，这个现象称为全反射。

满足 $\sin i_1 = \frac{n_1}{n_0}$ 条件的入射角 ϕ_c 称为临界角，相应的折射角为90度。

当光从光密介质大于临界角入射时，除反射光外，还有沿界面传播且在界面垂直方向上振幅按指数衰减的隐失波（倏逝波），具有一定的穿透深度。



7.3.2 薄膜光学性能的测量

薄膜光学性能的测量

在对光学薄膜进行设计与计算之前，对准备应用的薄膜性能应该有所了解，需要对其测量；同时，判断镀出来的薄膜性能是否能达到设计要求也需要测量。所以，薄膜光学性能的测量在制备光学薄膜时是必不可少的。这里仅对薄膜层透射率的原理作一简单的介绍。



7.3.2 薄膜光学性能的测量

薄膜光学性能的测量

1. 透射率的测量

测量透射率一般用分光光度计进行，它主要包括光源、分光系统、检测系统等几部分。图7-28是一个简单的透射率测量系统。测量时，首先让光从样品架的空格中通过，测得其光强为 I_0 ，然后把样品插入光路中，让光从样品上通过，测得其光强为 I_1 ，两次测得结果的比值就是样品的透射率 T ，即

$$T = \frac{I_1}{I_0} \times 100\%$$

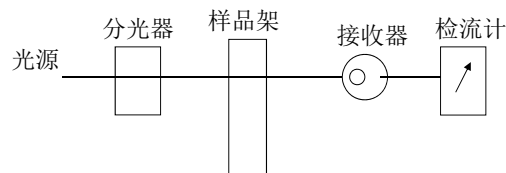


图7-28 透射率测量装置简图



7.3.2 薄膜光学性能的测量

2. 反

测量方
对于反
图7-29

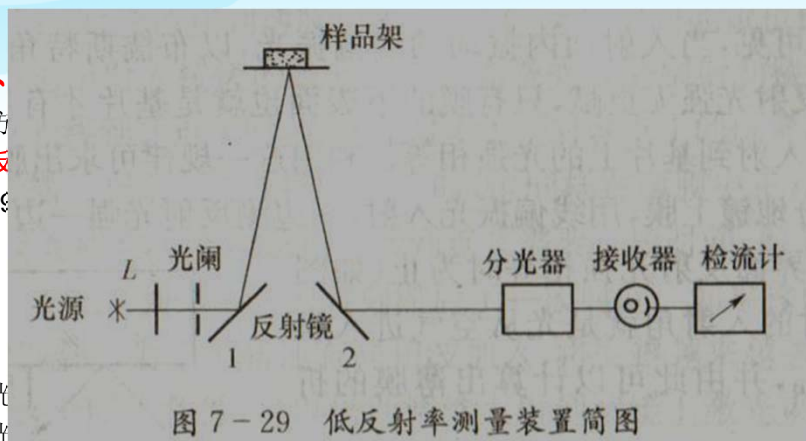


图7-29 低反射率测量装置简图

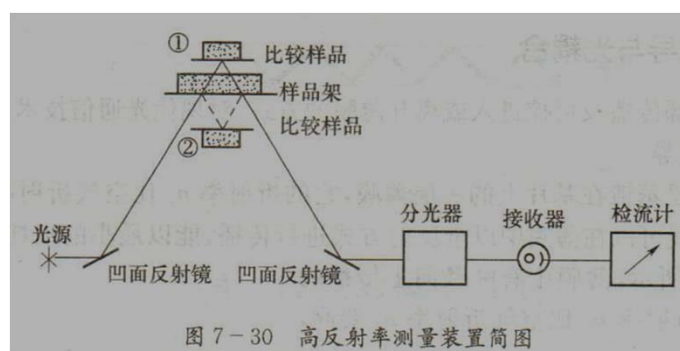
入射光
入分光

再换上待测样品，测出其反射光强 I_1 ，则待测样品的反射率为 $R = (I_1/I_0)R_0$ ，式中 R_0 是标准样品的反射率，其测量精度主要受标准样品反射率测量精度的影响。



7.3.2 薄膜光学性能的测量

对于**高反射率的薄膜**，一般用图7-30所示的**测量反射率的绝对方法**。测量时先不放待测样品，而把**比较样品**放在位置1上。这时光从样品上反射后进入检测系统，测出其反射光强度为 I_1 ；再把**待测样品**放在样品架上，**比较样品**放在位置2，于是入射光被**待测样品反射两次**以后再进入检测系统，测出反射光强为 I_2 。



7.3.2 薄膜光学性能的测量

两次测量的光强比为

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_0 R_1 R^2}{I_0 R_1} = R^2$$

式中， I_0 是入射光强度， R_1 是比较样品的反射率。由此可得样品的反射率：

$$R = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}}$$

测量结果只与光强测量的准确度有关，而与比较样品的反射率 R_1 无关，故称绝对测量。



7.3.2 薄膜光学性能的测量

透明薄膜折射率的测量

(1) 当光束垂直入射到单层薄膜表面时，反射率为

$$R = \frac{n_0 n_2 - n_1^2}{n_0 n_2 + n_1^2}$$

由式可得：

$$n_1 = \sqrt{\left(\frac{1-R}{1+R}\right) n_0 n_2}$$

当已知膜层两边介质的折射率 n_0 和 n_2 ，只需要准确测出垂直入射的反射率 R ，就可求出膜的折射率 n_1 。

精度低，但实用。



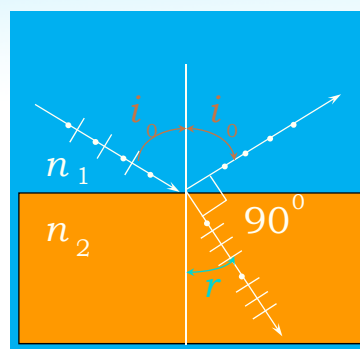
7.3.2 薄膜光学性能的测量

透明薄膜折射率的测量

(2) 基于布儒斯特角设计。P226

在入射面内振动的线偏振光，以布儒斯特角入射时，其反射光强为0，且有

$$\tan \phi_B = \frac{n_1}{n_0}$$



由此可见，当入射面内的线偏振光，以布儒斯特角入射于单层光学膜时，膜的上表面对反射光强无贡献，只有膜的下表面（基片）才有反射光，这时反射光光强和光束直接入射到基片上的光强相等。利用这一规律可求出膜的折射率。



7.3.2 薄膜光学性能的测量

透明薄膜折射率的测量

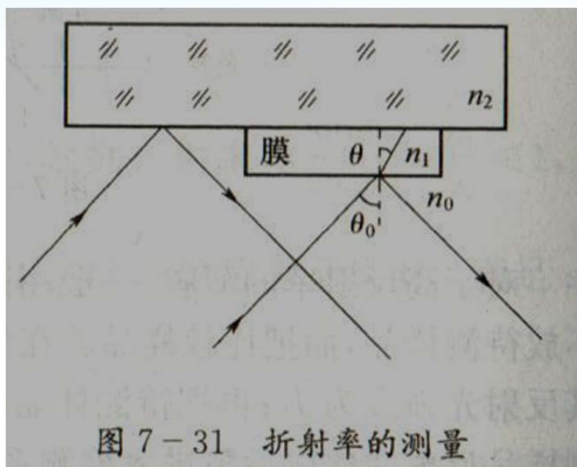


图 7-31 折射率的测量

基本方法：在基片上只部分镀上膜，用线偏光入射，一边测反射光强度，一边改变入射角，直到在镀膜和未镀膜两种界面反射光强相等为止。



7.3.2 薄膜光学性能的测量

透明薄膜折射率的测量

(3) 椭圆偏振法

偏法测量的基本思路是：起偏器产生的线偏振光经取向一定的1/4波片后成为特殊的椭圆偏振光，把它投射到待测样品表面时，只要起偏器取适当的透光方向，被待测样品表面反射出来的将是线偏振光。根据偏振光在反射前后的偏振状态变化，包括振幅和相位的变化，便可以确定样品表面膜的厚度以及折射率。



7.3.3 薄膜波导与光耦合

7.3.3 薄膜波导与光耦合

光在薄膜内部传播及可控进入或离开薄膜的方式。

薄膜波导

薄膜波导就是蒸镀在基片上的一层薄膜，它的折射率 n_1 比空气折射率 n_0 与基片折射率 n_2 都高，光线可以在薄膜中以全反射方式进行传播，能以最小的损耗传播很远的距离。如图 7-32 所示，薄膜中有一条向上传播的光线，因为薄膜折射率 n_1 比空气折射率 n_0 要高，当入射角大于临界角 $\phi_{c0} = \arcsin \frac{n_0}{n_1}$ 时，将发生上表面的全反射。反射光全部向下表面传播。同理，当入射角大于临界角 $\phi_{c1} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ 时又将在薄膜下表面发生全反射。如此反复进行反射，光在薄膜里将沿“Z”字型路径传播，也称为“Z”形波。

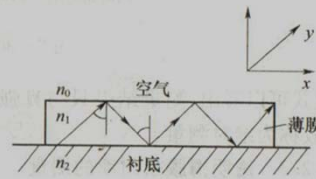


图 7-32 薄膜波导示意图



7.3.3 薄膜波导与光耦合

光耦合

由于薄膜非常薄，要把外面的光直接地对准薄膜边缘射入薄膜非常困难。同样，要将薄膜里传播的光准确而无损耗的传播出来也是非常困难的，这是集成光学中很重要的耦合问题。

棱镜耦合 P227

当入射的激光在棱镜的底面上全反射时，若入射光满足相位匹配条件，会产生光学隧道效应。光会通过空气隙进入薄膜。相位匹配的条件是指光在棱镜中沿Z方向传播的波矢量与光在薄膜沿Z方向传播的波矢分量相等。

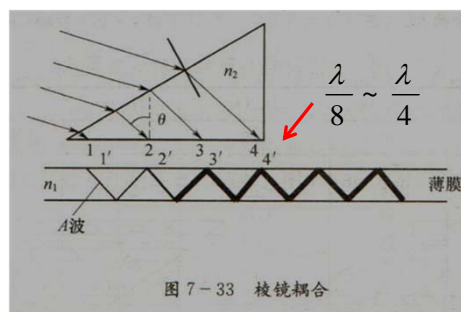


图 7-33 棱镜耦合