

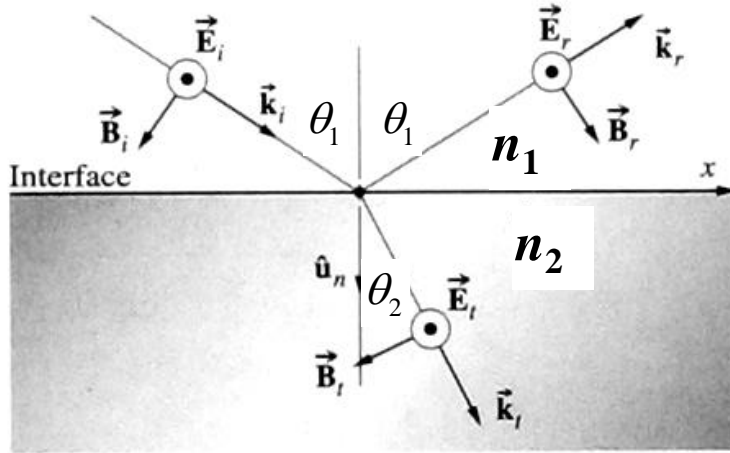


## § 5.4 反射和折射时光的偏振

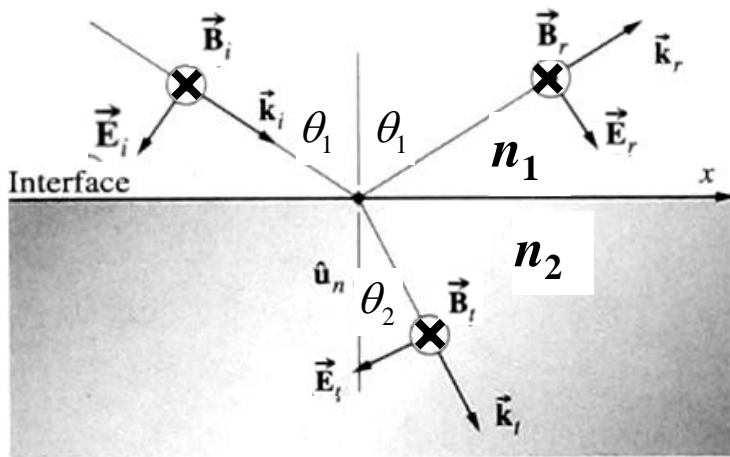


# 菲涅尔反射折射公式

**s波:  $E$ 垂直于入射面**



**p波:  $E$ 在入射面内**



菲涅尔公式

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

$$r_p = \frac{n_2 / \cos \theta_2 - n_1 / \cos \theta_1}{n_1 / \cos \theta_1 + n_2 / \cos \theta_2}$$

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

$$t_p = \frac{2n_1 / \cos \theta_2}{n_1 / \cos \theta_1 + n_2 / \cos \theta_2}$$



# 菲涅尔公式讨论

- 几种反射透射系数(率)的定义与区别

1. 菲涅耳系数  $r_{s,p}$  反映的是复振幅之间的关系，称为（振幅）反射系数，通常写作复数。

① 若入射角  $\theta_i$  小于全反射角，则  $r_{s,p}$  为正实数（或负实数），记为  $r_{s,p} = |r_{s,p}|e^{i0}$  (或  $r_{s,p} = |r_{s,p}|e^{i\pi}$ )；物理上表示，各光线以自己传播方向作参考，反射光和入射光的电场振动方向相同（相反）。

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

$$r_p = \frac{n_2 / \cos \theta_2 - n_1 / \cos \theta_1}{n_1 / \cos \theta_1 + n_2 / \cos \theta_2}$$

② 若入射角  $\theta_i$  大于全反射角，则  $r_{s,p}$  必为复数，记为  $r_{s,p} = |r_{s,p}|e^{i\varphi}$ ， $\varphi$  为反射位相，一般  $\varphi \neq 0, \pi$ 。（课外知识）



# 菲涅尔公式讨论

- 几种反射透射系数(率)的定义与区别

2. 菲涅耳系数  $t_{s,p}$  反映的是复振幅之间的关系，称为（振幅）透射系数，通常写作复数。

① 若入射角  $\theta_i$  小于全反射角，则

$t_{s,p}$  恒为正实数，记为

$$t_{s,p} = |t_{s,p}| e^{i0};$$

物理上表示，各光线以自己

传播方向作参考，透射光和入射光的电场振动方向相同。

② 若入射角  $\theta_i$  大于全反射角，则  $r_{s,p}$  必为复数，记为  $t_{s,p} = |t_{s,p}| e^{i\varphi}$ ， $\varphi$  为反射位相，一般  $\varphi \neq 0, \pi$ 。（课外知识）

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

$$t_p = \frac{2n_1 / \cos \theta_2}{n_1 / \cos \theta_1 + n_2 / \cos \theta_2}$$



# 菲涅尔公式讨论

- 几种反射透射系数(率)的定义与区别

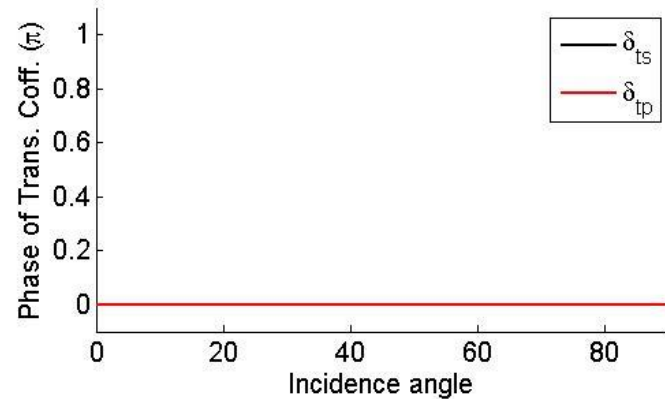
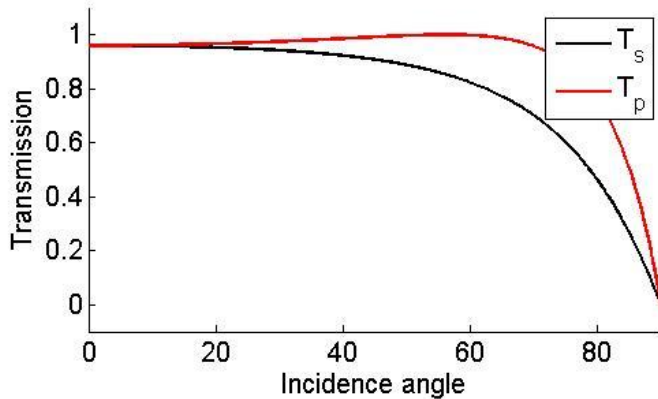
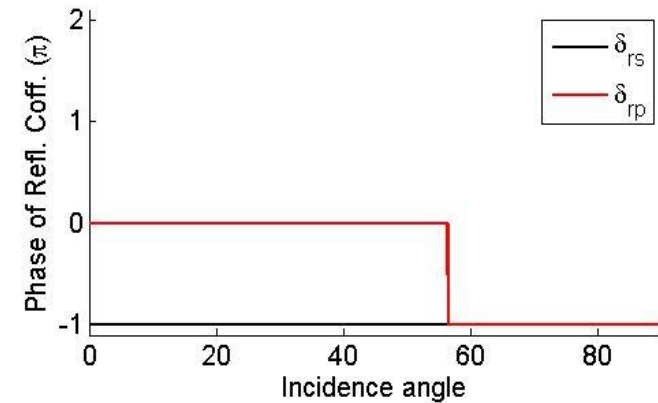
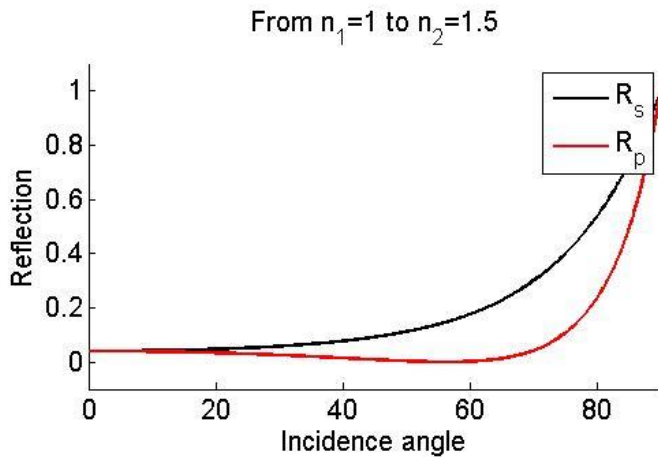
3. 能量反射率:  $R_{s,p}=|r_{s,p}|^2$  和

能量透射率:  $T_{s,p}=(n_2 \cos \theta_2 / n_1 \cos \theta_1) |t_{s,p}|^2$

反映的是能量(功率, 能流)之间的关系, 叫做能流反射率, 是实数。其中  $R_{s,p}+T_{s,p} = 1$  满足能量守恒定律

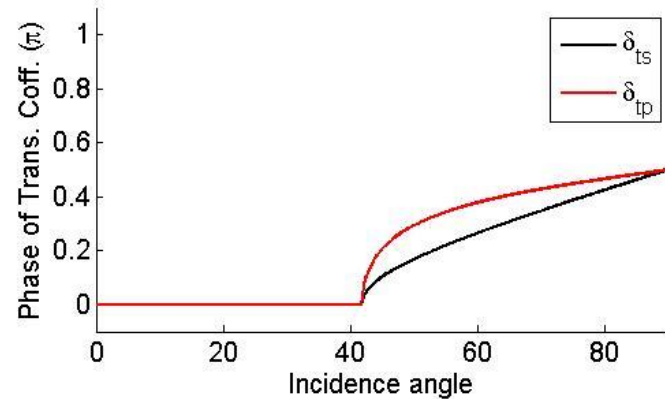
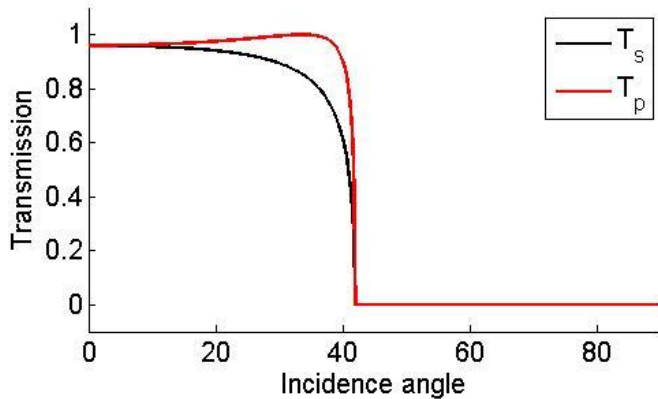
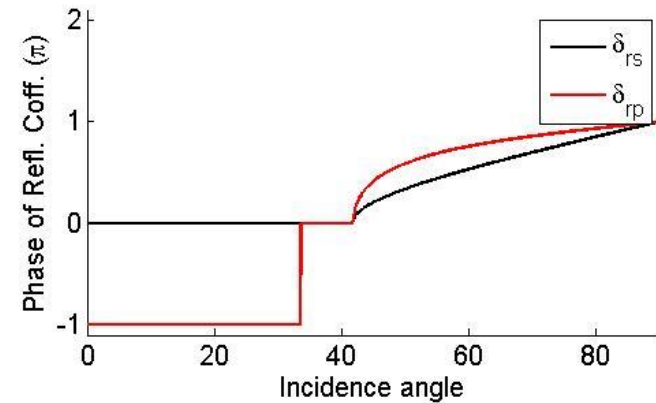
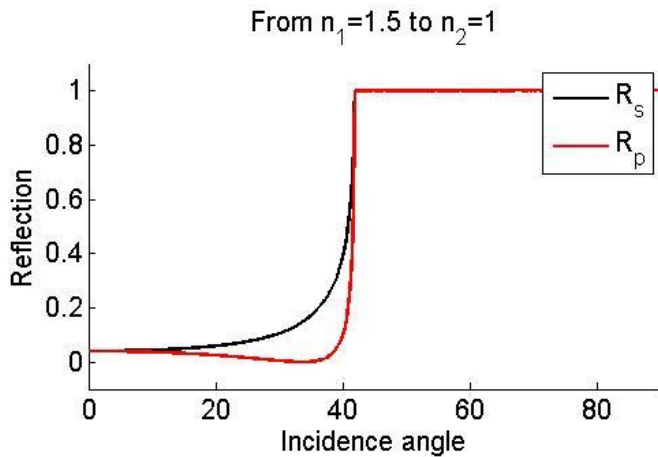


# Incidence from air ( $n=1$ ) to glass ( $n=1.5$ )





# Incidence from glass ( $n=1.5$ ) to air ( $n=1$ )





# 菲涅尔公式讨论2

正入射情况:

For incident angles  $\sim 0$  (i.e. nearly normal incidence) can simplify:

$$\left[ r_p \right]_{\theta_1=0} = \left[ -r_s \right]_{\theta_1=0} = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad \left[ t_p \right]_{\theta_1=0} = \left[ t_s \right]_{\theta_1=0} = \frac{2n_1}{n_2 + n_1}$$

例子:

air and glass interface,  $n_1=1$ ,  $n_2=1.5$ :  $\left[ r_p \right]_{\theta_1=0} = \left[ -r_s \right]_{\theta_1=0} = 0.2$

- 20% of wave amplitude is reflected.
- since energy is  $\sim E^2$ , the power losses on one reflection are 4%





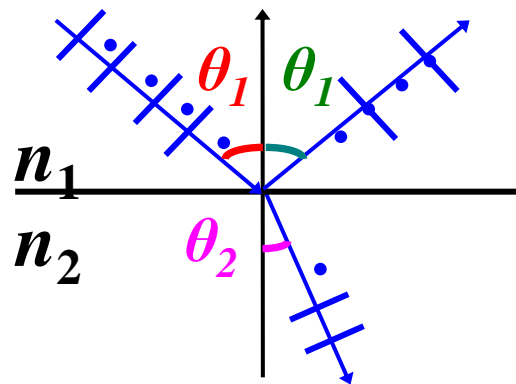
# 菲涅尔公式讨论3

- 1809年马吕斯发现，自然光经两种媒介分界面反射和折射时，反射光和折射光都是部分偏振光。在一定条件下，能达到最大的偏振度。

反射光中垂直入射面的分量比例大，  
折射光中平行入射面的分量比例大。

入射角  $\theta_1$  变  $\Rightarrow$   
反射、折射光的偏振度也变，  
当  $\theta_1 = \theta_{1B}$  时，反射光中  
只有垂直入射面的分量，

发现此时  $\theta_{1B} + \theta_2 = 90^\circ$



自然光反射和折射  
后产生部分偏振光



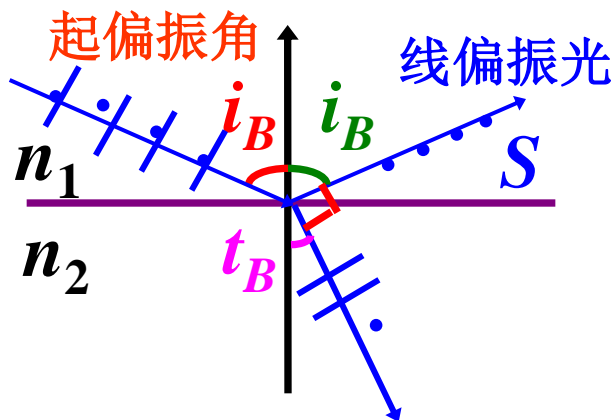
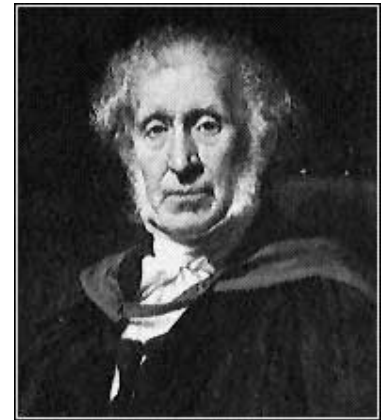
# 菲涅尔公式讨论3

从菲涅耳公式可知, 当  $\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$  时,  $r_p \rightarrow 0$ ,  $R_p = 0$ ,  $T_p = 100\%$ . 我们把此时的入射角  $\theta_1 = i_B$  叫做布儒斯特 (Brewster) 角. 由折射定律有

$$n_1 \sin i_B = n_2 \sin t_B = n_2 \cos i_B$$



$$\tan i_B = \frac{n_2}{n_1}$$



因此, 当非偏振光以等于  $i_B$  入射时, 反射光的  $p$  分量为  $0$ , 只有  $s$  分量的偏振光, 从而达到起偏目的。但对于透射光, 由于  $t_s$  和  $t_p$  始终不等于  $0$ , 因此, 透射光的依然是两种偏振光的混合, 但偏振程度不同, 成为部分偏振光。



# 菲涅尔公式讨论3

例： 若  $n_1=1.00$  (空气)，  $n_2=1.50$  (玻璃)。

$$\left. \begin{array}{l} \text{空气} \rightarrow \text{玻璃} \quad i_B = \arctan \frac{1.50}{1.00} = 56^\circ 18' \\ \text{玻璃} \rightarrow \text{空气} \quad i_B = \arctan \frac{1.00}{1.50} = 33^\circ 42' \end{array} \right\} \text{互余}$$

理论实验表明：反射所获得的线偏光仅占入射自然光总能量的7.4%（效率很低），而约占85%的垂直分量和全部平行分量都折射到玻璃中。



# 布氏角的应用



(A) 玻璃门表面的反光很强



(B)

用偏光镜减弱了反射偏振光



(C)

用偏光镜消除了反射偏振光, 使玻璃门内的人物清晰可见



# 菲涅尔公式讨论3

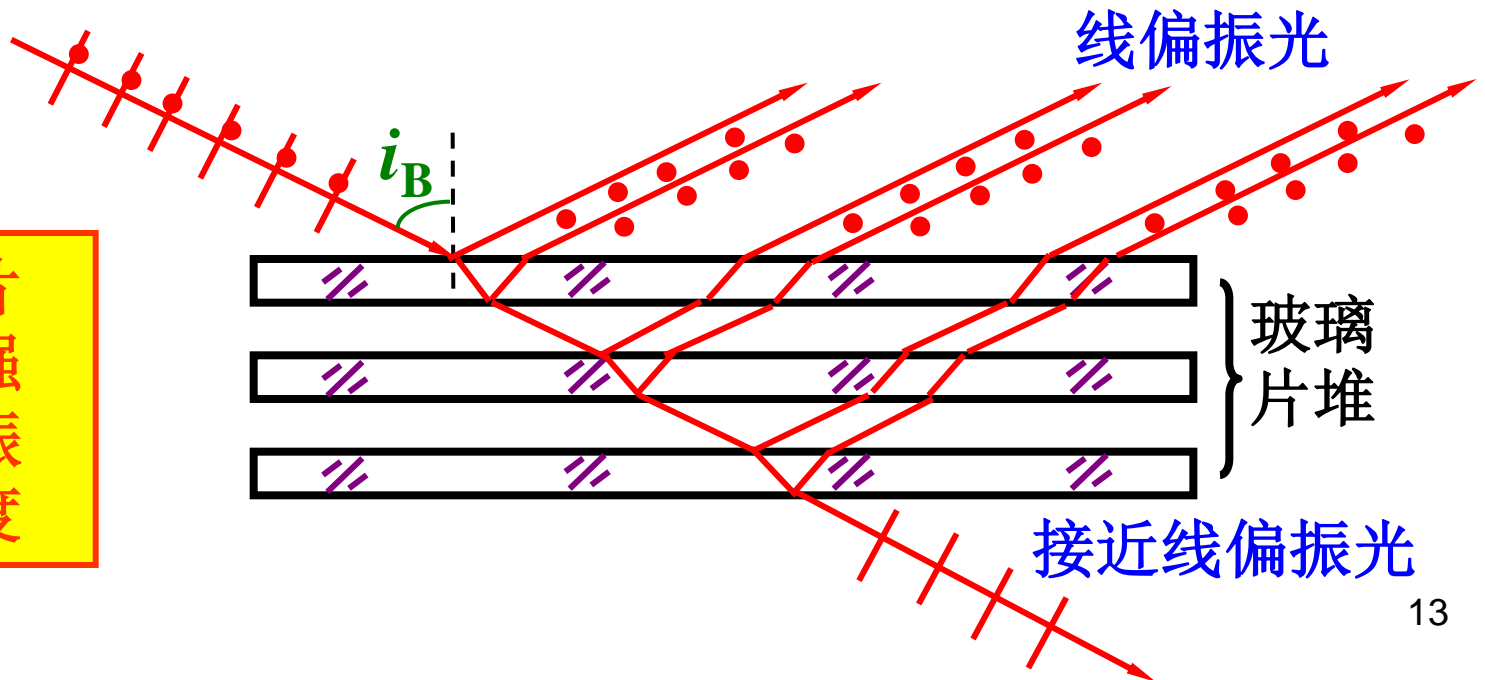
## 玻片堆起偏

由光的电磁理论，当 $i = i_B$ 时：

$$\frac{I_{\text{反}}}{I_{\lambda}} = \frac{1}{2} \sin^2(i_B - t_B)$$

自然光从空气→玻璃： $\frac{I_{\text{反}}}{I_{\lambda}} \approx 7\%$ （太弱）

用玻璃片堆能增强反射偏振光的强度





# 菲涅尔公式讨论3

例题：已知某材料在空气中的布儒斯特角  $i_p = 58^\circ$ ，求它的折射率？若将它放在水中（水的折射率为 1.33），求布儒斯特角？该材料对水的相对折射率是多少？

解：● 设该材料的折射率为  $n$ ，空气的折射率为 1

$$\tan i_p = \frac{n}{1} = \tan 58^\circ = 1.599 \approx 1.6$$

● 放在水中，则对应有  $\tan i'_p = \frac{n}{n_{\text{水}}} = \frac{1.6}{1.33} = 1.2$

所以：  $i'_p = 50.3^\circ$

该材料对水的相对折射率为 1.2



# 菲涅尔公式: 半波损失

1. 从光疏介质(空气)到光密介质(玻璃),随着入射角的增加,

① 平行(p)分量(红色线)

(a)反射率先减少后增大, 在布氏角处达到0。

透射率变化与反射率相反。

(b)反射位相在布氏角有突变, 从0变到 $\pi$ 。透射位相总是0。

② 垂直(s)分量(黑色线)

(a)反射率一直增大。透射率变化与反射率相反。

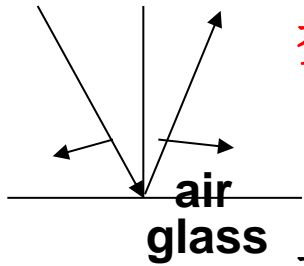
(b)反射位相总是 $\pi$ 。透射位相总是0。



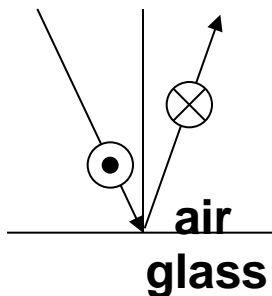
## 菲涅尔公式: 半波损失

- 当接近正入射时(如牛顿环), 入射光的电矢量恒生 $\pi$ 的位相改变, 这相当于反射光多走了半个波长。具体来说:

- ① 平行(p)分量: 反射位相为0, 表明以各自的传播方向为参考, 反射光和入射光的电场振动方向相同。但是, 由于反射光和入射光的传播方向相反, 因而在分界面上反射光和入射光的电场振动方向恰好相反。这表示位相突变 $\pi$ 。



- ② 垂直(s)分量: 反射位相为 $\pi$ , 表明以各自的传播方向为参考, 反射光和入射光的电场振动方向相反(图中用 $\bullet$ 和 $\times$ 表示)。显然在分界面上反射光和入射光的电场振动方向恰好相反。这表示位相突变 $\pi$ 。



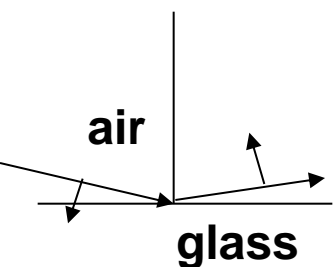




## 菲涅尔公式: 半波损失

— 当接近90度入射时(如劳埃德镜), 入射光的电矢量恒生 $\pi$ 的位相改变, 这相当于反射光多走了半个波长。具体来说:

- ① 平行(p)分量: 反射位相为 $\pi$ , 表明以各自的传播方向为参考, 反射光和入射光的电场振动方向相反。但是, 由于反射光和入射光的传播方向近乎相同, 因而在分界面上反射光和入射光的电场振动方向近乎相反。这表示位相突变 $\pi$ 。



- ② 垂直(s)分量: 与正入射情况一致, 也存在位相突变 $\pi$ 。

总的来说, 光从光疏介质到光密介质, 反射光有半波损失。

请自行分析: 1. 光从光密介质到光疏介质, 不存在半波损失。  
2. 透射光不存在半波损失。3. 单层对称薄膜结构(book图6-20)必存在半波损失。



# 其他菲涅尔公式讨论（自学）

**1. Stokes定理 (P281)**

**2. 全反射与倏势（隐失）波（P288）**



# Homework 14 (submit on June 12)

## 1. 习题 P334 6-5