

第二十四章

光的偏振

(Polarization of light)

本章目录

- § 24.1 光的偏振状态
- § 24.2 线偏振光的获得与检验
- § 24.3 反射和折射光的偏振，*散射光的偏振
- § 24.4 双折射现象
- § 24.5 椭圆偏振光和圆偏振光
- § 24.6 偏振光的干涉
- Δ § 24.7 人工双折射
- *Δ § 24.8 旋光现象

§ 24.1 光的偏振状态

偏振 光矢量垂直于传播方向

偏振态 在垂直于传播方向的平面内,光矢量具有的各种振动状态

偏振光的分类

- 完全非偏振光—自然光 (natural light)
- 完全偏振光 线偏振光, 圆偏振, 椭圆偏振
- 部分偏振光

一、完全偏振光

1、线偏振光 (linearly polarized light)

面对光的传播方向看

从侧面看

振动面 振动方向与传播方向

线偏振光可沿任意两个相互垂直的方向分解:

线偏振光表示法:

光振动垂直纸面 光振动平行纸面

2、圆偏振光 (circularly polarized light)

椭圆偏振光 (elliptically polarized light)

固定点观察

右旋圆偏振光

右旋椭圆偏振光

右旋 还是左旋?

某时刻圆偏振光 E 随 z 的变化

线、圆和椭圆偏振光—完全偏振光

●圆和椭圆偏振光可看成是两束频率相同、传播方向一致、振动方向相互垂直、相位差为某个确定值的线偏振光的合成。

x, y 振幅相同,

相位差 $\pi/2$ 或 $3\pi/2$

相位差不等于 0, $\pi/2, \pi, 3\pi/2$ 和 2π

相位差 0 和 π $\alpha=45^\circ$

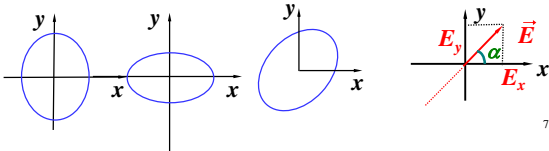
●圆和椭圆偏振光可看成是两束频率相同、传播方向一致、振动方向相互垂直、相位差为某个确定值的线偏振光的合成。

x, y 振幅不相同,

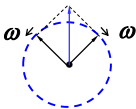
相位差 $\pi/2$
或 $3\pi/2$

相位差不等于 0,
 $\pi/2, \pi, 3\pi/2$
和 2π

相位差0和 π
 $\alpha \neq 45^\circ$

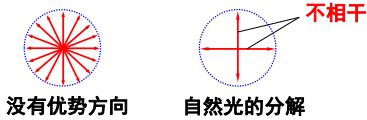


●线偏振光则可以看成是两束频率相同、相位相同、振幅相同、传播方向也相同的左、右旋圆偏振光的合成。



【演示】圆偏振光和椭圆偏振光模型

二、完全非偏振光—自然光 (natural light)



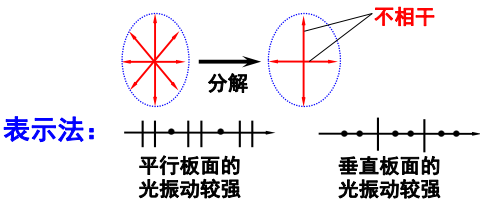
一束自然光可分解为两束振动方向相互垂直的、等幅的、不相干的线偏振光。

$$\vec{E}_x = \vec{E}_y \quad I = I_x + I_y = 2I_x$$

自然光的表示法:

三、部分偏振光

自然光和完全偏振光的混合，就构成了部分偏振光。部分偏振光可看成是自然光和线偏振光的混合，天空中的散射光和水面的反射光就是这种部分偏振光，它可以分解如下：



四、偏振度 (degree of polarization)

偏振度:
$$P = \frac{I_p}{I_t} = \frac{I_p}{I_n + I_p}$$

I_t — 部分偏振光的总强度

I_p — 部分偏振光中包含的完全偏振光的强度

I_n — 部分偏振光中包含的自然光的强度

完全偏振光 (线、圆、椭圆) $P = 1$

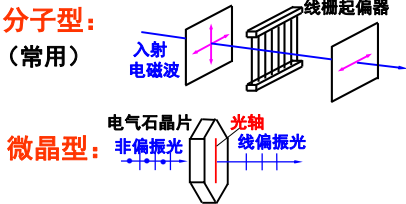
自然光 (非偏振光) $P = 0$

部分偏振光 $0 < P < 1$

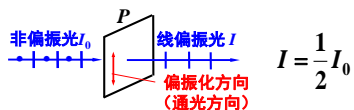
§ 24.2 线偏振光的获得与检验

一、起偏：从自然光获得偏振光

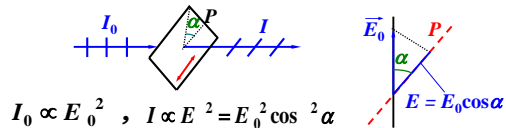
- 起偏器 (polarizer)：起偏的光学器件
- 起偏的原理：利用某种光学的不对称性
- 偏振片 (Polaroid) P (获得线偏振光)



● 线偏振光的起偏



二、马吕斯定律 (Malus law)



$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad \text{—— 马吕斯定律 (1809)}$$

$$\alpha = 0, I = I_{\max} = I_0, \quad \alpha = \frac{\pi}{2}, I = 0 \quad \text{—— 消光}$$

例 两个偏振片叠放在一起，强度为 I_0 的自然光垂直入射，若通过两个偏振片后的光强为 $I_0/8$ 。

求 此两偏振片的偏振化方向夹角（取锐角）；
若在两片之间插入另一偏振片，其偏振化方向与前后两片的偏振化方向夹角（取锐角）相等，则通过3个偏振片后的透射光强度？



$$I = \frac{I_0}{2} \cos^2 \alpha = \frac{I_0}{8} \Rightarrow \cos \alpha = \frac{1}{2} \Rightarrow \alpha = \frac{\pi}{3}$$

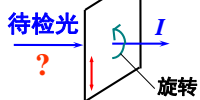
$$I = \frac{I_0}{2} \cos^2 \frac{\pi}{6} \cos^2 \frac{\pi}{6} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{3}{4} I_0 = \frac{9}{32} I_0$$

14

三、线偏振光的检偏

检偏：用偏振器件检验光的偏振态

设入射光可能是**自然光**或**线偏振光**或由线偏振光与自然光混合而成的**部分偏振光**



- 若 I 不变，是什么光？（自然光、圆偏振光）
- 若 I 变，有消光，是什么光？（线偏振光）
- 若 I 变，无消光，是什么光？（部分偏振光、椭圆偏振光）

【演示】线偏振光的起偏和检偏

15

四、偏振片的应用

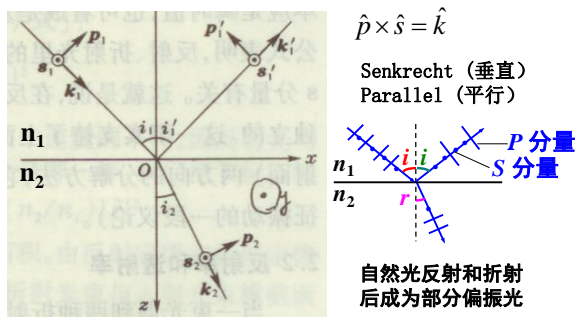
偏振片的应用很多，例如：

- 作为许多光学仪器中的起偏和检偏装置。
- 作为照相机的滤光镜，可以滤掉不必要的反射光。
- 制成偏光眼镜，可观看立体电影。
- 若在所有汽车前窗玻璃和车灯前都装上与地面成 45° 角、且向同一方向倾斜的偏振片，可以避免汽车会车时灯光的晃眼。

16

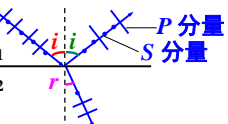
§ 24.3 反射和折射光的偏振 * 散射光的偏振

一、反射和折射时光的偏振



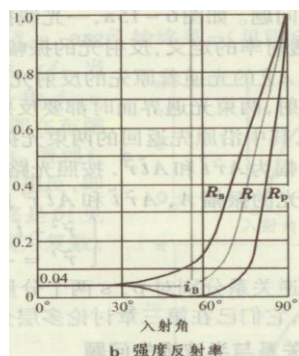
$$\hat{p} \times \hat{s} = \hat{k}$$

Senkrecht (垂直)
Parallel (平行)

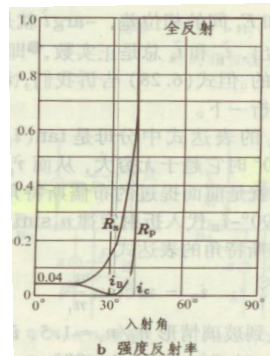


自然光反射和折射后成为部分偏振光

17

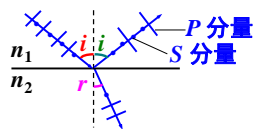


从空气到玻璃



从玻璃到空气

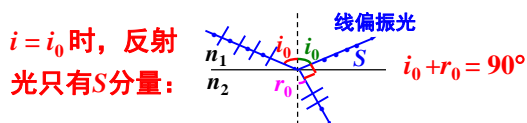
18



自然光反射和折射后成为部分偏振光

反射光垂直入射面的分量 (S) 比例大,
折射光平行入射面的分量 (P) 比例大,
入射角 i 变 \rightarrow 反射、折射光的偏振度也变。
入射面: 入射线与界面法线构成的面。

19



$i = i_0$ 时, 反射光只有 S 分量:
 i_0 — 布儒斯特角 (Brewster angle) 或 起偏角

$$n_1 \sin i_0 = n_2 \sin r_0 = n_2 \cos i_0$$

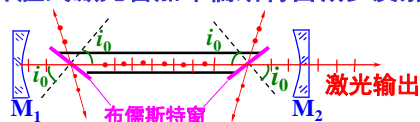
得布儒斯特 (Brewster) 定律 (1812年)

$$\tan i_0 = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

20

若 $n_1 = 1.00$ (空气), $n_2 = 1.50$ (玻璃),
则: 空气 \rightarrow 玻璃 $i_0 = \tan^{-1} \frac{1.50}{1.00} = 56^\circ 18'$
玻璃 \rightarrow 空气 $i'_0 = \tan^{-1} \frac{1.00}{1.50} = 33^\circ 42'$ } 互余

例: 外腔式激光管加布儒斯特窗减少反射损失



垂直分量损耗大, 不能形成激光, 但平行分量能形成激光。

【思考】如何测量不透明介质的折射率?

21



有反射光干扰的橱窗



在照相机镜头前加偏振片消除了反射光的干扰

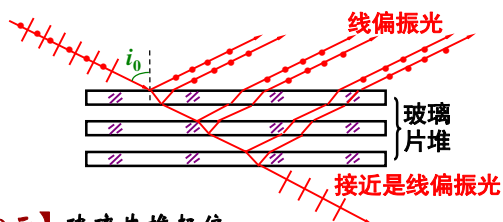
消除反射光对照相的影响 (截选).mpg

22

二、玻璃片堆起偏和检偏

1、起偏: 当 $i = i_0$ 时反射光是线偏振的, 可用来起偏。

但单次反射的反射光强太低 (只占15%), 而且方向发生变化, 使用不方便。因此更多利用 $i = i_0$ 时的折射光起偏, 并采用玻璃片堆增大透射光的偏振度。



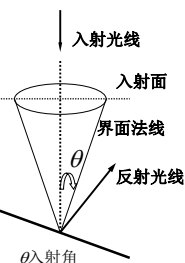
【演示】玻璃片堆起偏

23

2、检偏 (不包括圆和椭圆偏振光)

让待检验的光以布儒斯特角 i_0 入射到界面上, 保持 $i = i_0$ 不变, 以入射线为轴旋转界面:

- 若反射光光强不变 \Rightarrow 入射光是自然光;
- 若反射光光强变且有消光 \Rightarrow 入射光是线偏振光;
- 若反射光光强变且无消光 \Rightarrow 入射光是部分偏振光。



【演示】反射起偏与检偏模型

24

自然光

线偏振光

线偏振光

此时无反射光

让待检验的光以布儒斯特角 i_0 入射到界面上，保持 $i = i_0$ 不变，以入射线为轴旋转界面：

→ 反射面的法线随之旋转

→ 入射面随之旋转

→ 入射光的振动方向与入射面的相对关系随之改变。

若旋转 90° ，则相对关系完全颠倒（相反）。

25

***三、散射光的偏振**

1. 散射光的产生

在入射光的激励下，**媒质分子中的电子做受迫振动**

这可视之为振动的电偶极子，它向周围辐射电磁波（子波）。

理论可以证明，只要分子的密度是均匀的（在光波波长尺度范围内，密度的统计平均是均匀的），次波相干叠加的结果，只剩下遵从几何光学规律的光线，沿其余方向的振动完全抵消。

如果介质的均匀性受到破坏，

就形成了各方向都有的散射光。

振荡电偶极子电磁辐射强度的角分布

$I(\theta)$

26

2、瑞利散射

电偶极子辐射的次波中，振幅正比于 $\sin \theta$

强度正比于 $\sin^2 \theta$

振荡电偶极子电磁辐射强度的角分布

光的散射与介质颗粒的线度有关。颗粒线度小于十分之一波长的散射—**瑞利散射**。

瑞利定律（1899）：散射光强与 λ^4 成反比。

【演示】白光的散射

27

3、散射光的偏振

P处发出的不同方向的偶极辐射有不同的偏振情况

散射光偏振方向：

- ▲ 横波条件
- ▲ 在以入射光诱发的偶极振子方向共面

入射光线偏振

散射光线偏振

28

入射光线偏振

散射光线偏振

29

自然光入射

自然光入射等同于线偏振光入射时图样绕入射方向旋转一周

在垂直于入射光的方向上散射光是线偏振的

30

入射自然光

散射光为线偏振光

散射光为自然光

例如：天空大气散射的日光就是部分偏振光。颜色偏蓝。

散射光为部分偏振光，随 θ 角而变。

回顾瑞利定律（1899）：散射光强与 λ^4 成反比。

就白光（可见光）而言，其短波长（高频）部分（蓝紫色）的光散射得比长波长（低频）部分（红色）散射得多。

31

●蜜蜂和某些鸟可辨别出大气散射光的偏振，从而用来确定方向。

●多次散射可以把个别散射方向的不对称抵消，从而可消除偏振。

【演示】光不能透过两个互相垂直的偏振片，但在其间夹一蜡纸（形成多次散射），光又能透过了。

32

§ 24.4 双折射（birefringence）现象

一、双折射的概念

1、双折射：一束光入射到各向异性介质时，折射光分成两束的现象。

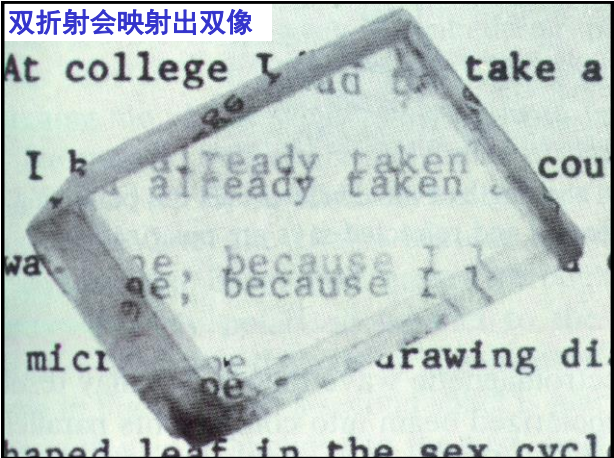
2、寻常（o）光和非寻常（e）光

o光：遵从折射定律 $n_1 \sin i = n_2 \sin r_o$

e光：一般不遵从折射定律 $\frac{\sin i}{\sin r_e} \neq \text{const.}$

e光折射线也不一定在入射面内。

33



【演示】方解石模型 方解石的双折射

以入射方向为轴旋转方解石

正入射时，没有偏折（在晶体中沿原方向传播）的光为o光，遵从普通的折射定律；有偏折（偏离原来的方向传播）的光为e光，违背普通的折射定律。

双折射的两束光（o光和e光）偏振方向相互垂直

所谓的o光和e光，只在双折射晶体的内部才有意义，射出晶体后，就无所谓o光和e光了。

35

如何区分o光和e光形成的像？

纸面

双折射

光

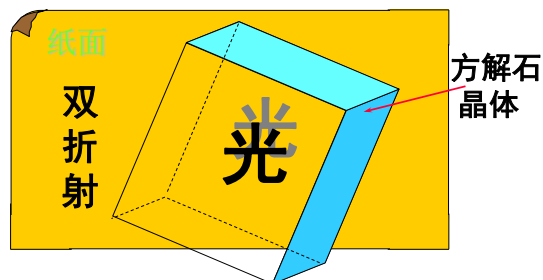
e光的像

方解石晶体

o光的像

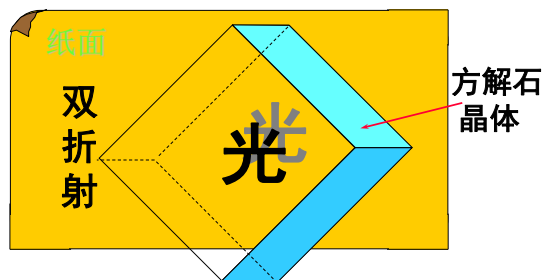
36

继续旋转方解石晶体：



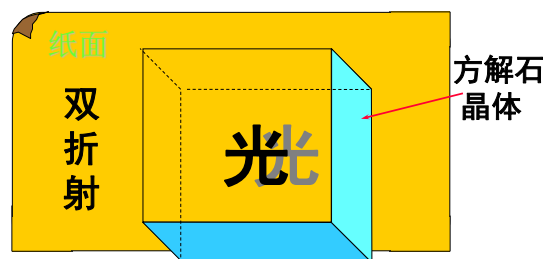
37

继续旋转方解石晶体：



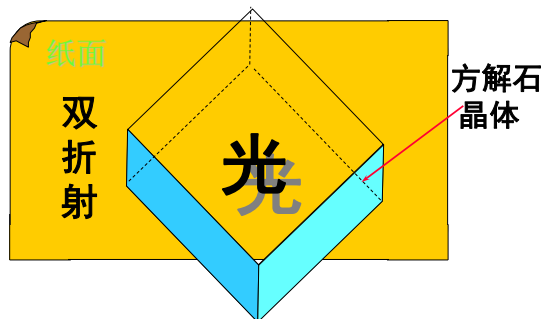
38

继续旋转方解石晶体：



39

继续旋转方解石晶体：



当方解石晶体旋转时，o 光的像不动，
e 光的像围绕 o 光的像旋转。

40

3、晶体的光轴 (optical axis of crystal)

当光在晶体内沿某个特殊方向传播时**不**发生双折射，该**方向**称为晶体的**光轴**。

例如，方解石晶体（冰洲石）的光轴：由**钝顶角**（顶点处三个面角均为钝角）引出的与三个棱边成等角的方向就是**光轴**。

光轴是一个特殊的方向，**凡平行于此方向的直线均为光轴**。

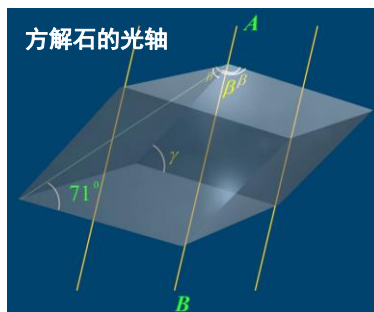
单轴晶体：只有一个光轴的晶体，如方解石。

双轴晶体：有两个光轴的晶体，如云母。

注意：不要把此处的“光轴”与几何光学中透镜的“光轴（光心）”混为一谈。

41

方解石的光轴



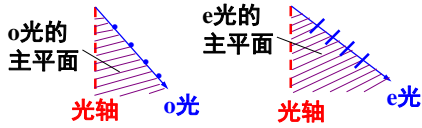
顶点A和B处的三个面角均为钝角(其余六个顶点处的三个面角都是一钝二锐)，A和B称为钝隅，它们的连线是方解石晶体的三重对称轴线；与六面体的每个面都成 45.5° ；与每条棱边也成 63.8° 的夹角。

【演示】方解石的光轴（模型与视频）

42

4、主平面 (principal plane)

晶体中光的传播方向与晶体光轴构成的平面叫该束光的**主平面**。



o光振动方向**不在**主平面内（而是与主平面垂直）。
e光振动方向**在**主平面内。

注意：要牢牢把握偏振方向与光轴的关系，即

o光振动方向与光轴相垂直

e光振动方向与光轴相平行

43

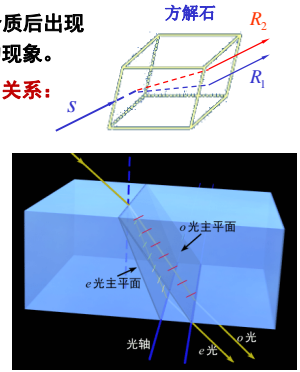
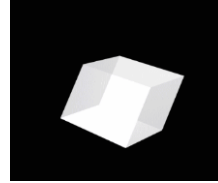
双折射现象

一束光入射到各向异性的介质后出现两束折射光线（o光和e光）的现象。

o光和e光偏振方向与光轴的关系：

o光振动方向与光轴相垂直

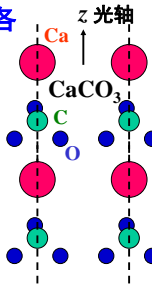
e光振动方向与光轴相平行



44

二、晶体的主折射率，正晶体、负晶体

晶体的各向异性：



光矢量 \vec{E} 平行于光轴时，

介电常数为 ϵ_z

光矢量垂直于光轴时，

介电常数为 ϵ_x, ϵ_y

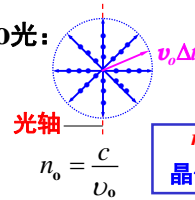
$$\epsilon_x = \epsilon_y \neq \epsilon_z$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \propto \frac{1}{\sqrt{\epsilon}}$$

光矢量振动方向与晶体光轴的夹角不同，介电常数就不同，光的传播速度也就不同。

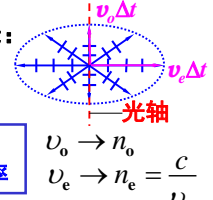
45

o光：



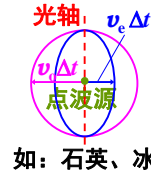
$$n_o = \frac{c}{v_o}$$

e光：

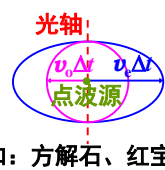


n_o, n_e 称为晶体的主折射率

正晶体： $n_e > n_o$ ($v_e < v_o$) 负晶体： $n_e < n_o$ ($v_e > v_o$)



如：石英、冰



如：方解石、红宝石

46

三、单轴晶体中光传播的惠更斯作图法

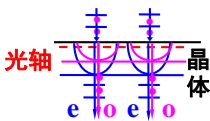
以惠更斯原理为依据的惠更斯作图法，是研究光在晶体中传播的重要方法。

（波射线：由波源指向波前公共切线的切点）

下面以负晶体 ($v_e > v_o$) 为例，介绍该方法：

1、光轴平行晶体表面，自然光垂直入射

o、e方向上虽没分开，但速度上是分开的，这仍是双折射。

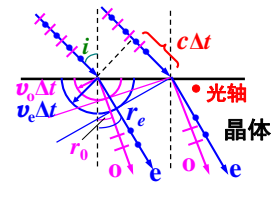


47

2、光轴平行晶体表面，且垂直入射面，自然光斜入射

$$\frac{\sin i}{\sin \gamma_o} = \frac{c}{v_o} = n_o$$

$$\frac{\sin i}{\sin \gamma_e} = \frac{c}{v_e} = n_e$$

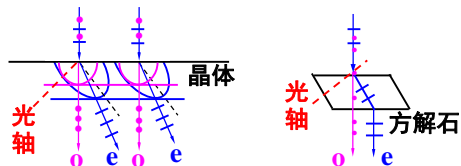


在这种特殊的情况下，对e光也可以用折射定律。（光轴垂直于入射面）

（旋转椭球面的转轴就是光轴，所以，旋转椭球与入射面的交线也是圆）

48

3、光轴与晶体表面斜交，自然光垂直入射



这正是前面演示的情形。

此时e光的波面不再与其波射线垂直了。

49

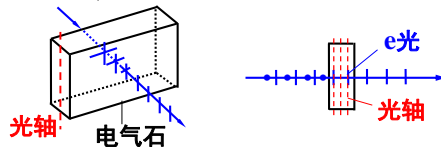
§ 24.5 椭圆偏振光和圆偏振光

一、晶体起偏器件

1、晶体的二向色性、晶体偏振器

某些晶体对o光和e光的吸收有很大差异，这叫晶体的**二向色性** (dichroism)。

例如，电气石对o光有强烈吸收，对e光吸收很弱，用它就可以产生线偏振光。

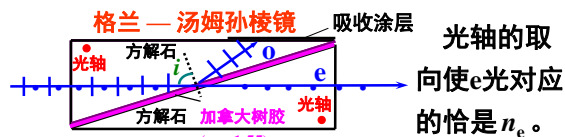


50

2、偏振棱镜

偏振棱镜可由自然光获得**高质量的线偏振光**，它又可分为**偏光棱镜**和**偏光分束棱镜**。

●**偏光棱镜**：可由自然光获得原方向的线偏振光



$$n_o (1.6584) > n (1.55) > n_e (1.4864)$$

$i > \text{临界角}$, o光全反射了, e光可通过。

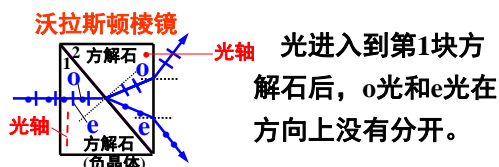
对比：全反射角(光导纤维与导光水柱)与布儒斯特角

51

●偏光分束棱镜：

对于方解石
 $n_o (1.6584) > n_e (1.4864)$

可由自然光获得分开的两束线偏振光

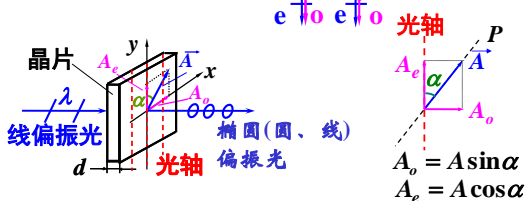


由于方解石2和方解石1二者光轴垂直，当光进入到方解石2时，o光变成e光($n_o > n_e$)：光密→光疏(远离法线传播)；而e光变成o光：光疏→光密(靠近法线传播)。于是两光束在界面处发生折射而分开。

52

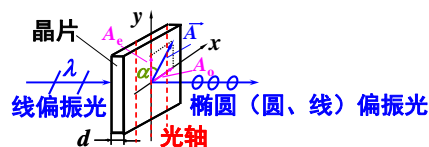
二、晶体相移器件 圆和椭圆偏振光的起偏

晶片：光轴平行于表面的晶体薄片。



从晶片出射的两束光(振动方向互相垂直)由于出现相位差，而合成为一束椭圆、圆或线偏振光。

53

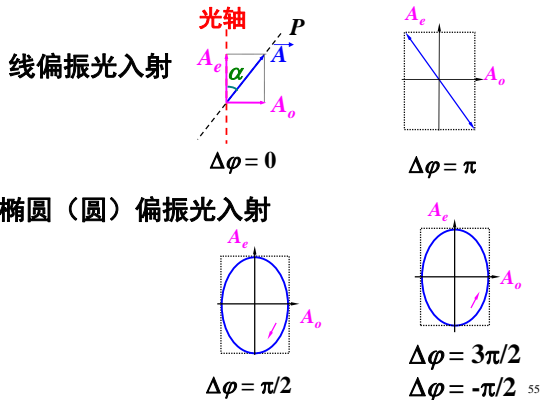


从晶片出射的两束光，振动方向互相垂直，出射的光实际上是振动方向互相垂直的两束光的合成问题，其偏振状态取决于出射表面两束光的位相差。

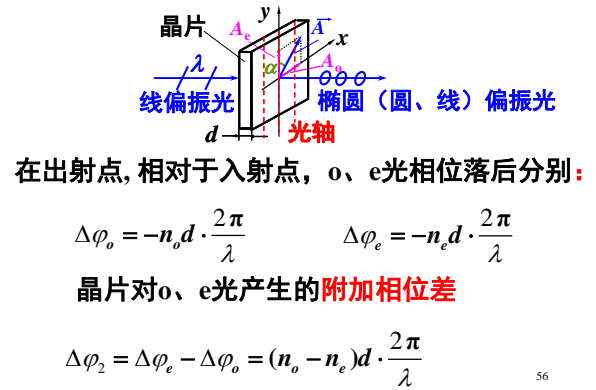
出射点两束光的位相差取决于(1)入射点的位相和(2)通过晶片引起的位相差之和。

54

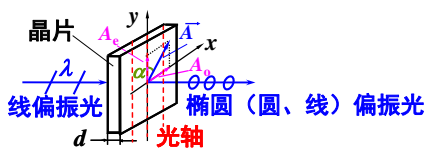
(1) 入射点的位相差 $\Delta\varphi_1$



(2) 晶片对o、e光产生的附加相位差 $\Delta\varphi_2$



56



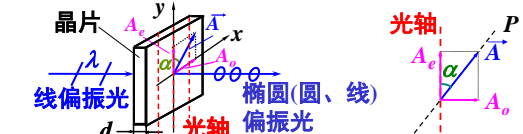
在出射点o、e光总的相位差:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2$$

当 $|\Delta\varphi| = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots$, 出射光为椭圆(圆)偏振光

当 $|\Delta\varphi| = \pi, 3\pi, \dots$, 出射光仍为线偏振光

57



(3) 四分之一波(晶)片 (quarter-wave plate)

厚度满足 $|n_e - n_o| \cdot d = \frac{\lambda}{4} \rightarrow |\Delta\varphi| = \frac{\pi}{2}$

可从线偏振光获得椭圆或圆偏振光 (或相反)

$\alpha = \pi/4$: 线偏振光 → 圆偏振光

$\alpha = 0, \pi/2$: 线偏振光 → 线偏振光

$\alpha \neq 0, \pi/4, \pi/2$: 线偏振光 → 椭圆偏振光

【演示】圆椭圆偏振光 [圆椭圆偏振光.mpg](#)

58

2、二分之一波片

$$|n_e - n_o| \cdot d = \frac{\lambda}{2} \rightarrow |\Delta\varphi| = \pi$$

可使线偏振光振动面转过 2α 角度

3、全波片

$$|n_e - n_o| \cdot d = \lambda \rightarrow |\Delta\varphi| = 2\pi$$

注意: 波片是对某个确定波长 λ 而言的

【演示】四分之一波片 二分之一波片

59

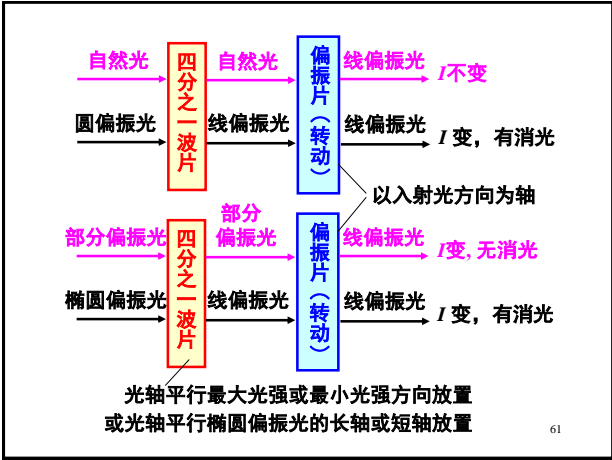
三、椭圆与圆偏振光的检偏

【思考】如何用四分之一波片和偏振片区分

自然光和圆偏振光

部分偏振光和椭圆偏振光

60



61

【思考】

- 如何区分由自然光和椭圆偏振光组成的部分偏振光，与由自然光和线偏振光组成的部分偏振光？
- 如何区分由自然光和圆偏振光组成的部分偏振光，与自然光？

四分之一波片, 光轴与强光方向成45度

62

§ 24.6 偏振光的干涉

一、偏振光干涉装置

二、偏振光干涉的分析

1、振幅关系

在 P_1 后: $A_o = A_1 \sin \alpha$
 $A_e = A_1 \cos \alpha$

在 P_2 后: $A_{2o} = A_o \cos \alpha = A_1 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$
 $A_{2e} = A_e \sin \alpha = A_1 \sin \alpha \cdot \cos \alpha = A_{2o}$

63

2、相位关系

通过晶体 C 后: $|\Delta \phi| = \frac{2\pi d}{\lambda} |n_e - n_o|$
 此两束光合成为一束椭圆偏振光。

再通过 P_2 后:

$$|\Delta \phi| = \frac{2\pi d}{\lambda} |n_e - n_o| + \pi$$

成为两束相干光。

64

$$|\Delta \phi| = \frac{2\pi d}{\lambda} |n_e - n_o| + \pi, \text{ 与 } d \text{ 和 } \lambda \text{ 有关}$$

- 如果 $\Delta \phi = 2k\pi \rightarrow d = \frac{2k-1}{2} \cdot \frac{\lambda}{|n_e - n_o|}, (k=1, 2, \dots)$
 — 相长干涉, P_2 后面的光场最明亮。
- 如果 $\Delta \phi = (2k+1)\pi \rightarrow d = \frac{k}{|n_e - n_o|} \lambda$
 — 相消干涉, P_2 后面的光场最暗。

若单色光入射, 且 d 不均匀, 则屏上为等厚条纹。

65

石英劈尖的偏振光干涉 (等厚条纹)

66

三、色偏振 (chromatic polarization)

若白光入射，且晶片 d 均匀，则：屏上由于某种颜色干涉相消，而呈现它的互补色，这叫 (显) 色偏振。如：

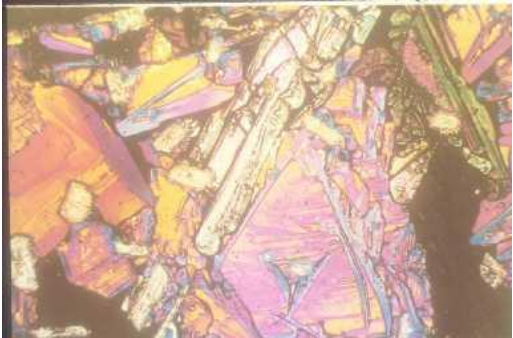
红色 (656.2 nm) 相消 → 绿色 (492.1nm) ；
蓝色 (485.4nm) 相消 → 黄色 (585.3 nm) 。

若 d 不均匀，则屏上出现彩色条纹。

【演示】等厚显色偏振 (显色偏振截选)

色偏振是检验材料有无双折射效应的灵敏方法，用显微镜观察各种材料在白光下的色偏振，可以分析物质内部的某些结构 — 偏光显微术。

67



硫代硫酸钠晶片的色偏振图片

结冰过程偏光显微摄影.MPG

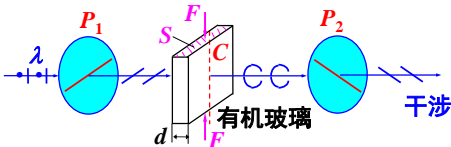
68

§ 24.7 人工双折射

人为地造成各向异性，而产生双折射。

一、光弹效应 (photoelastic effect)

光弹效应也叫应力双折射效应。



应力 → 各向异性 → n 各向不同

在一定应力范围内： $|n_e - n_o| = k \frac{F}{S}$

69

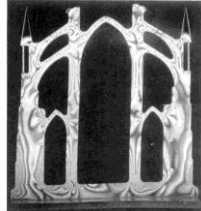
$$|\Delta\phi| = \frac{2\pi d}{\lambda} |n_e - n_o| + \pi = \frac{k \cdot d \cdot 2\pi}{\lambda} \cdot \frac{F}{S} + \pi$$

各处 $\frac{F}{S}$ 不同 → 各处 $\Delta\phi$ 不同 → 出现干涉条纹，
 $\frac{F}{S}$ 变 → $\Delta\phi$ 变 → 干涉情况变。

吊钩的光弹图象



模型的光弹图象



【演示】

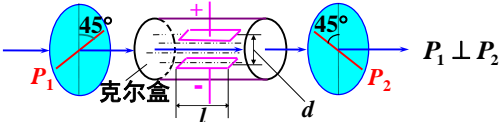
应力双折射

70

二、电光效应 (electro-optic effect)

电光效应也叫电致双折射效应。

1、克尔效应 (kerr effect) (1875年)



盒内充某种液体，如硝基苯 ($C_6H_5NO_2$)

- 不加电场 → 液体各向同性 → P_2 不透光；
- 加电场 → 液体呈单轴晶体性质，光轴平行电场强度 \vec{E} → P_2 透光。

71

$$|n_e - n_o| = kE^2 = k \frac{U^2}{d^2} \text{ — 二次电光效应}$$

k — 克尔常数， U — 电压

克尔效应引起的相位差为：

$$\Delta\phi_k = \frac{2\pi}{\lambda} |n_e - n_o| l = 2\pi l \frac{kU^2}{\lambda d^2}$$

$\Delta\phi_k = \pi$ 时，克尔盒相当半波片， P_2 透光最强。

硝基苯 $k = 1.44 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{V}^2$ ，若 $l = 3\text{cm}$ ，

$d = 0.8\text{cm}$ ，对 $\lambda = 600\text{nm}$ 的黄光，当

$\Delta\phi_k = \pi$ 时的电压 $U \approx 2 \times 10^4 \text{ V}$ 。

72

克尔盒的应用：

可作为**光开关**（响应时间~10⁻⁹s），
用于高速摄影、激光通讯、光速测距、
脉冲激光系统（作为Q开关）…

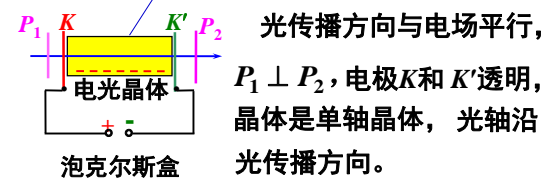
克尔盒的缺点：

硝基苯有毒，易爆炸，需要极高的纯度和加数万伏的高电压，故现在很少用。

73

2、泡克尔斯效应（pockels effect）（1893年）

KH_2PO_4 （KDP）、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ （ADP）等



- 不加电场→ P_2 不透光。
- 加电场→晶体变双轴晶体 →原光轴方向附加了双折射效应 → P_2 透光。

74

泡克尔斯效应引起的相位差：

$$\Delta\varphi_p = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r U \quad \text{— 线性电光效应}$$

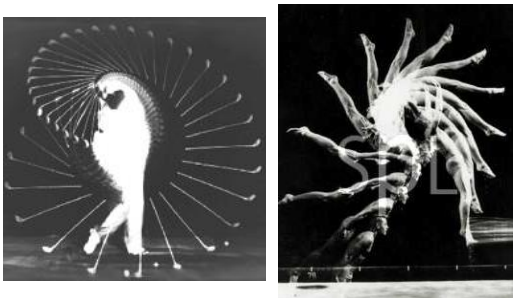
n_o —o光在晶体中的折射率； r — 电光常数；
 U —电压。 $\Delta\varphi_p = \pi$ 时， P_2 透光最强。

KH_2PO_4 （KDP）、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ （ADP）等单晶都具有线性电光效应。如KDP $n_o = 1.51$ ，
 $r = 10.6 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ ，对 $\lambda = 546 \text{ nm}$ 的绿光，
 $\Delta\varphi_p = \pi$ 时， $U = 7.6 \times 10^3 \text{ V}$ 。

应用：超高速开关（响应时间小于10⁻⁹s），
激光调Q，显示技术，数据处理…

75

高速摄影图片：

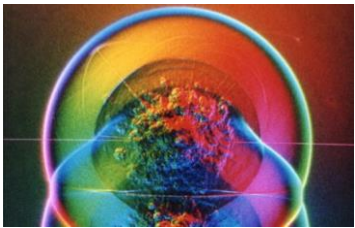


击高尔夫球的动作

后空翻动作

76

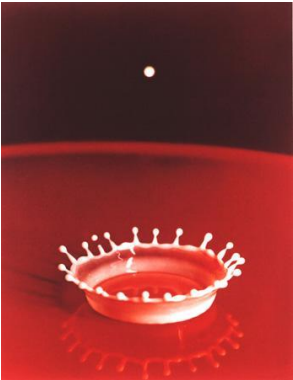
爆炸瞬间



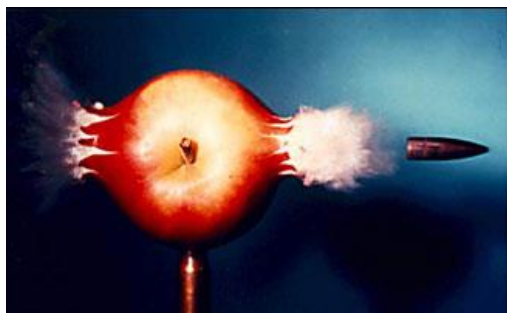
一微秒尺度下拍摄的纹影照片，展示的是两次相互影响的小爆炸产生的冲击波，同时为空气密度加上色码。

77

牛奶滴向盘中的牛奶



78



子弹射穿苹果的瞬间

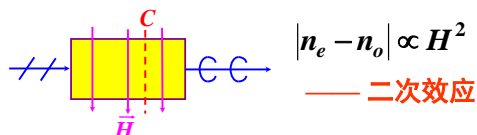
高速摄影(截选长).MPG

79

三、磁致双折射

科顿 — 穆顿 (Cotton-Mouton) 效应:

某些透明液体在磁场 H 作用下变为各向异性, 性质类似于单轴晶体, 光轴平行磁场。



需要很强的磁场才能观察到。

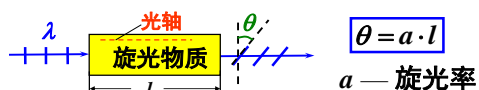
80

*§ 24.8 旋光现象

一、物质的旋光性 (optical activity)

1811年, 法国物理学家阿喇果 (Arago) 发现, 线偏振光沿光轴方向通过石英晶体时, 其振动面能发生旋转, 这称为旋光现象。

除石英外, 氯酸钠、乳酸、松节油、糖的水溶液等也都具有旋光性。



81

实验表明, 旋光率 a 与旋光物质和入射波长有关, 对于溶液, 还和旋光物质的浓度有关。

石英对 $\lambda = 589\text{nm}$ 的黄光, $a = 21.75^\circ/\text{mm}$; 而对 $\lambda = 408\text{nm}$ 的紫光, $a = 48.9^\circ/\text{mm}$ 。

物质的旋光性是和物质原子排列结构有关的, 同一种物质也可以有左旋体和右旋体, 它们的原子排列互为镜像对称, 称为对映异构体。

二、菲涅耳对旋光性的解释

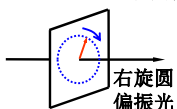
线偏振光可看作是同频率、等振幅、有确定相位差的左(L)、右(R)旋圆偏振光的合成。

82

圆偏振光沿传播方向的相位变化

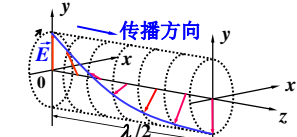
以右旋圆偏振光为例

固定点 $\vec{E} \sim t$



右旋圆偏振光

同一时刻 $\vec{E} \sim x$

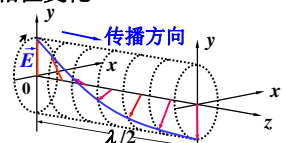


某时刻右旋圆偏振光 \vec{E} 随 z 的变化

83

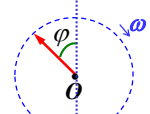
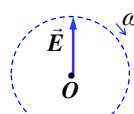
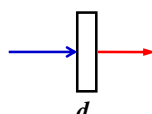
圆偏振光沿传播方向的相位变化

同一时刻 $\vec{E} \sim x$



某时刻右旋圆偏振光 \vec{E} 随 z 的变化

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} nd$$



84

$v_L \neq v_R \rightarrow n_L \neq n_R$
 光通过旋光物质后，位相要滞后。设入射时L、R位相为0，旋光物质长为l，在出射面上：

同一时刻

$$\begin{cases} \text{位相 } \varphi_R = -\frac{n_R l}{\lambda} \cdot 2\pi < 0, \\ \text{位相 } \varphi_L = -\frac{n_L l}{\lambda} \cdot 2\pi < 0. \end{cases}$$

设 $n_R > n_L$ (即 $v_L > v_R$)，则 $|\varphi_R| > |\varphi_L|$
 此物质为左旋体($v_L > v_R$)

入射面(a) 出射面(b)
 光通过左旋物质

入射面(a) 出射面(b)

由图示: $\theta = \frac{1}{2} [|\varphi_R| + |\varphi_L|] - |\varphi_L| = \frac{1}{2} [|\varphi_R| - |\varphi_L|]$
 $= -\frac{1}{2} [\varphi_R - \varphi_L] = \frac{\pi}{\lambda} (n_R - n_L) \cdot l$

令 $\theta = a \cdot l$ ，则 $a = \frac{\pi}{\lambda} (n_R - n_L)$ — 旋光率

这既解释了旋光现象，又说明了旋光率a与物质（由 n_R 和 n_L 反映）和入射波长有关。

菲涅耳进行了如下实验，证实了自己的假设。

如图示，用右旋型（R）和左旋型（L）石英棱镜交替胶合成多级组合棱镜。

光从R进入L时，左旋光速度由小变大，从光密媒质→光疏媒质，光将远离界面法线折射。右旋光速度由大变小，将靠近界面法线折射。各界面继续使左右旋圆偏振光分开的角度放大，射出棱镜时就成了两束分开的圆偏振光。

三、量糖术

对旋光溶液有 $\theta = [a] \cdot C \cdot l$

$[a] \cdot C = a$ — 溶液的旋光率，
 C — 溶液的浓度，
 $[a]$ — 溶液的比旋光率。

“量糖计”可分析旋光（同分）异构体的成分，广泛用在化学和制药等工业中。例如：氯霉素天然品为左旋体，合成品为左、右旋各半，称合霉素，其中只左旋有疗效。用量糖术可分离出左旋品（左霉素），疗效同天然品。

四、磁致旋光（magnetic opticity）

水、二硫化碳、食盐、乙醇等都是磁致旋光物质。

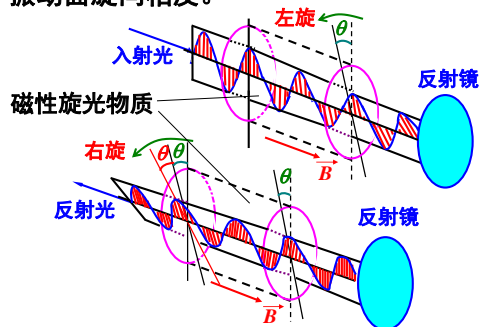
旋转的角度 $\theta = V \cdot l \cdot B$

V — 费德尔常量， $V \sim 10^4 - 10^5 \text{ m}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$

对自然旋光物质，振动面的左旋或右旋是由旋光物质本身决定的，与光的传播方向无关。

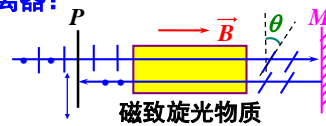
入射光 左旋 反射镜
 自然旋光物质 反射光 左旋 反射镜

对磁致旋光物质，光沿 \vec{B} 与逆 \vec{B} 方向传播，
振动面旋向相反。



91

光隔离器:



令 $\theta = 45^\circ$ ，则 $2\theta = 90^\circ$ ，反射光通不过P
这样可以消除反射光的干扰。

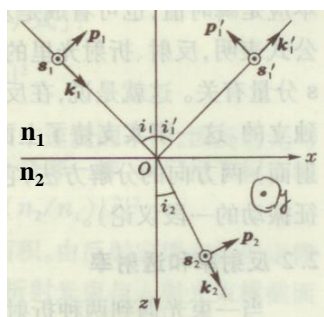
磁致旋光效应的应用： 研究物质结构
测电流和磁场
磁光调制



“波动光学”全部结束

92

菲涅耳反射折射公式



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

Senkrecht (垂直)
Parallel (平行)

93

菲涅耳反射折射公式-振幅

$$\tilde{E}'_{1p} = \frac{n_2 \cos i_1 - n_1 \cos i_2}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \tilde{E}_{1p} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)} \tilde{E}_{1p}$$

$$\tilde{E}_{2p} = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \tilde{E}_{1p}$$

$$\tilde{E}'_{1s} = \frac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} \tilde{E}_{1s} = \frac{\sin(i_2 - i_1)}{\sin(i_2 + i_1)} \tilde{E}_{1s}$$

$$\tilde{E}_{2s} = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} \tilde{E}_{1s} = \frac{2 \cos i_1 \sin i_2}{\sin(i_2 + i_1)} \tilde{E}_{1s}$$

94

菲涅耳反射折射公式-振幅反射率和折射率

$$r_p = \frac{\tilde{E}'_{1p}}{\tilde{E}_{1p}} = \frac{n_2 \cos i_1 - n_1 \cos i_2}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)}$$

$$t_p = \frac{\tilde{E}_{2p}}{\tilde{E}_{1p}} = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2}$$

$$r_s = \frac{\tilde{E}'_{1s}}{\tilde{E}_{1s}} = \frac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} = \frac{\sin(i_2 - i_1)}{\sin(i_2 + i_1)}$$

$$t_s = \frac{\tilde{E}_{2s}}{\tilde{E}_{1s}} = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} = \frac{2 \cos i_1 \sin i_2}{\sin(i_2 + i_1)}$$

95