

光学笔记

Optics Notes

丁毅

中国科学院大学，北京 100049

Yi Ding

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2024.8 – 2025.1

目录

目录	I
1 偏振	1
1.1 偏振光的性质	1
1.1.1 椭圆偏振光	1
1.1.2 线偏振光	2
1.1.3 自然光	2
1.2 偏振光的数学表示	3
1.2.1 斯托克斯参量	3
1.2.2 琼斯矢量	3
1.2.3 琼斯矩阵和穆勒矩阵	4
1.3 双折射	5
1.3.1 双折射现象	5
1.3.2 相位延迟片	7
1.3.3 偏振光的检验	8

第1章 偏振

在这一章，我们将要讨论光会以什么样的状态（即偏振态）进行传播、合成，如何观察、产生和改变光的偏振态，以及如何利用它。相比于干涉和衍射两章，本章内容较为简短，因为许多介绍性的东西都没有放在这里（抄教材不符合我们的初衷），读者若感兴趣，可阅读文献[?]的 Page 425-497。

§ 1.1 偏振光的性质

偏振光可粗略地分为自然光（非偏振光），部分偏振光，（椭）圆偏振和线偏振。其中，线偏振态又记为 \mathcal{P} 态，左圆和右圆分别记为 \mathcal{L} 和 \mathcal{R} 态。

1.1.1 椭圆偏振光

由于 \mathbf{E} 的矢量性，所有偏振光的电矢量 \mathbf{E} 都可以分解为两个互相垂直（正交）的光扰动：

$$\mathbf{E}_x = E_{0x} \cos(kz - \omega t) \cdot \hat{i}, \quad \mathbf{E}_y = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \cdot \hat{j} \quad (1.1)$$

其中 \hat{i} 和 \hat{j} 表示分解的方向， E_{0x} 和 E_{0y} 是分量的振幅（可能是时间的函数）， ε 为相位差（可能是时间的函数）。对于 E_{0x} 、 E_{0y} 和 ε 都为常量的情况，合成的光多为椭圆偏振光：

$$E_y = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \implies \frac{E_y}{E_{0y}} = [\cos(kz - \omega t) \cos \varepsilon - \sin(kz - \omega t) \sin \varepsilon] \quad (1.2)$$

由 $\sin^2(kz - \omega t) = 1 - \cos^2(kz - \omega t) = 1 - \frac{E_x^2}{E_{0x}^2}$ ，可以得到：

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}} - \cos \varepsilon \frac{E_x}{E_{0x}} \right)^2 = \sin^2 \varepsilon \left(1 - \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} \right) \quad (1.3)$$

$$\implies \frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos \varepsilon = \sin^2 \varepsilon \quad (1.4)$$

$$\iff \frac{E_x^2}{(E_{0x} \sin \varepsilon)^2} + \frac{E_y^2}{(E_{0y} \sin \varepsilon)^2} - 2 \frac{E_x E_y}{(E_{0x} \sin \varepsilon)(E_{0y} \sin \varepsilon)} = 1 \quad (1.5)$$

由高中的知识可知，当 $\varepsilon \neq k\pi$ ， $k \in \mathbb{Z}$ 时，这是一个椭圆（或圆）方程，因为 $\Delta = B^2 - 4AC = 4 \cos^2 \varepsilon - 4 < 0$ 。这样的偏振光称为椭圆偏振光。

椭圆偏振光也分左旋和右旋，这是因为从观察点向光源看去时（光指向“眼睛”），若 $\varepsilon \in (0, \pi)$ ，我们“看到”的由 E_x 和 E_y 合成后的 \mathbf{E} 在逆时针旋转（左旋）。一个典型的例子是 $\varepsilon = \frac{\pi}{2}$ 时，也即 E_x “领先” E_y 相位 $\frac{\pi}{2}$ ：

$$\mathbf{E}_x = E_{0x} \cos(kz - \omega t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz) \cdot \hat{i}, \quad (1.6)$$

$$\mathbf{E}_y = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \frac{\pi}{2}) = E_{0y} \sin(\omega t - kz) \cdot \hat{j} \quad (1.7)$$

由椭圆的参数方程知道， $\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y$ 的极角 $\theta = (\omega t - kz)$ 随时间 t 增大， \mathbf{E} 逆时针旋转，称为左圆光。相反，当 $\varepsilon \in (\pi, 2\pi)$ 时（也可以说是 $(-\pi, 0)$ ）， \mathbf{E} 顺时针旋转（右旋），称为右圆光。

随着 ε 不同， \mathbf{E} 的形状和方向也不同，但总的来讲，椭圆主轴夹角满足：

$$\tan(2\alpha) = 2 \cos \varepsilon \cdot \frac{E_{0x} E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (1.8)$$

$$\implies \alpha = \frac{1}{2} \arctan \left(2 \cos \varepsilon \cdot \frac{E_{0x} E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \right) \quad (1.9)$$

主轴，是指长轴，也即 $2E_{0x}$ 和 $2E_{0y}$ 中更长的轴与对应的 x 或 y 轴夹角。举个例子，当 $E_{0x} > E_{0y}$ 时， x 为主轴（长轴）， α 为长轴与 x 轴的夹角，此时 α 随 ε 的变化如图 1.1 (a) 所示；当 $E_{0x} < E_{0y}$ 时，情况则相反， α 是长轴与 y 轴的夹角，如图 1.1 (b) 所示。

从图中可以看出，随着 ε 不断变化，椭圆会在主轴附近“摆动”，而不是转动。

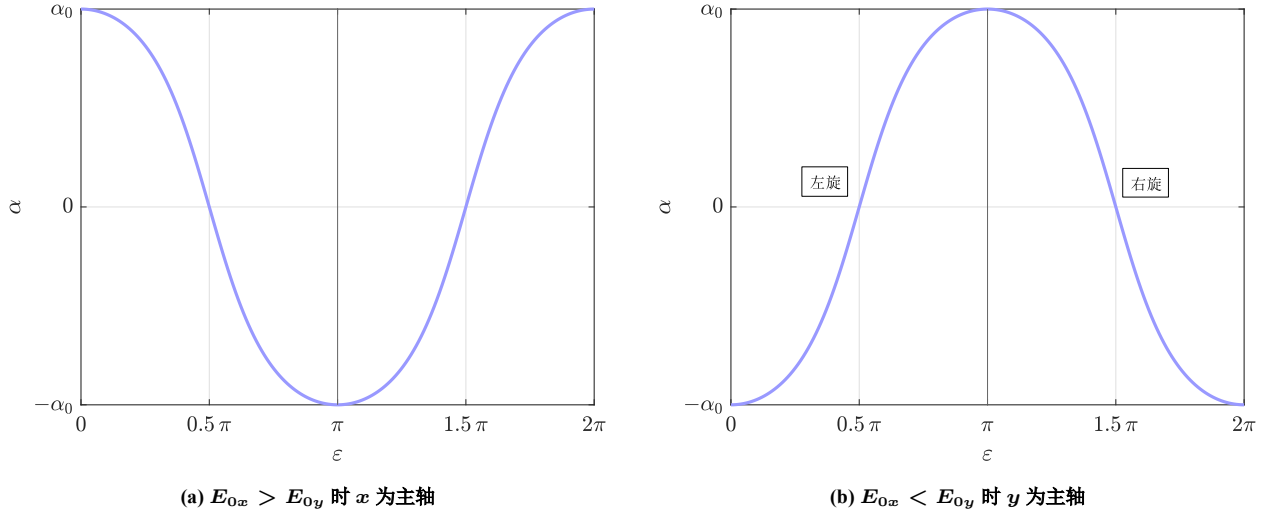


图 1.1: α 随 ε 的变化情况

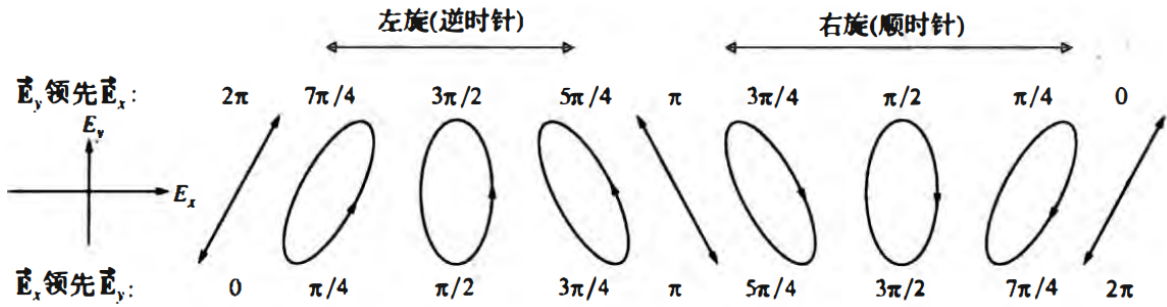


图 1.2: 主轴为 y 时椭圆的“摆动”情况

特别地，我们指出，若 x 为主轴 ($E_{0x} > E_{0y}$)，则 α 一定在 $(-45^\circ, 45^\circ)$ 之间，这表明椭圆的长轴更“贴近” x 轴， y 的情况也同理。另外，当 $E_{0x} = E_{0y}$ 时，椭圆退化为圆，不存在 α 的概念，但左旋和右旋仍然存在。

1.1.2 线偏振光

当 $\varepsilon = k\pi$, $k \in \mathbb{Z}$ 时，方程退化为：

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}} \pm \frac{E_y}{E_{0y}} \right)^2 = 0 \iff \frac{E_x}{E_{0x}} \pm \frac{E_y}{E_{0y}} = 0 \quad (1.10)$$

这是一个直线方程，表示线偏振光。

1.1.3 自然光

特别地，对于自然光，我们可以用两个振幅相等、非相干（即相位差 ε 迅速且无规变化）、正交的线偏振光的合成来表示自然光，这是数学上是一种非常方便的处理。

§ 1.2 偏振光的数学表示

偏振光的状态可以用向量来描述，常见的有斯托克斯（四维）参量和琼斯矢量（二维）。前者可以描述所有偏振光（包括完全和不完全）和非偏振光，但参数较多，后者仅可以描述偏振光，但较为简洁。相应地，偏振光器件对偏振光的作用可以用矩阵来表示，分别对应穆勒矩阵（四维）和琼斯矩阵（二维）。

1.2.1 斯托克斯参量

设想有四个滤波片，它们都只能透过一半（强度）的入射光。第一个是简单各向同性地，允许各个方向的偏振通过；第二个是（通光轴）水平的线偏振器，第三个是（通光轴） 45° 的线偏振器；最后一个为右圆起偏器（对 \mathcal{L} 不透明）。

把每个滤光片分别放在要研究的光束的光路上，也即光路上每次只有一个偏振器，测量到的辐照度分别记为 I_0, I_1, I_2, I_3 ，则斯托克斯参量的定义为：

$$\delta_0 = 2I_0, \quad \begin{cases} \delta_1 = 2I_1 - \delta_0 \\ \delta_2 = 2I_2 - \delta_0 \\ \delta_3 = 2I_3 - \delta_0 \end{cases} \quad (1.11)$$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 直接反映了光束的偏振态。具体而言：

- (1) δ_1 反映光束更接近水平 \mathcal{P} 态 ($\delta_1 \rightarrow \delta_0$) 还是竖直 \mathcal{P} 态 ($\delta_1 \rightarrow -\delta_0$)；
- (2) δ_2 反映光束更接近 $+45^\circ$ \mathcal{P} 态 ($\delta_2 \rightarrow \delta_0$) 还是 -45° \mathcal{P} 态 ($\delta_2 \rightarrow -\delta_0$)；
- (3) δ_3 反映光束更接近右旋 ($\delta_3 \rightarrow \delta_0$) 还是左旋 ($\delta_3 \rightarrow -\delta_0$)

对于准单色光 \mathbf{E} ，将其分解为 \mathbf{E}_x 和 \mathbf{E}_y ，可将斯托克斯参量进一步写为：

$$\delta_0 = \langle E_{0x}^2 \rangle_T + \langle E_{0y}^2 \rangle_T, \quad \delta_1 = \langle E_{0x}^2 \rangle_T - \langle E_{0y}^2 \rangle_T, \quad \delta_2 = \langle 2E_{0x}E_{0y} \cos \varepsilon \rangle_T, \quad \delta_3 = \langle 2E_{0x}E_{0y} \sin \varepsilon \rangle_T \quad (1.12)$$

我们在上式中略去了常数 $\frac{\varepsilon_0 c}{2}$ ，因此这些参量现在正比于辐照度。把每个参量都除以 δ_0 以归一化常常带来很大的方便，此时 $\delta_k \in [-1, 1]$, $k = 1, 2, 3$ 。

描述一束光偏振程度的量，称为偏振度 \mathbf{V} ，定义为：

$$\mathbf{V} = \frac{\sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}}{\delta_0} \quad (1.13)$$

对两束不相干的光 ($\delta'_0, \delta'_1, \delta'_2, \delta'_3$) 和 ($\delta''_0, \delta''_1, \delta''_2, \delta''_3$)，在斯托克斯参量下，可以直接将它们的偏振态相加，得到合成的光的偏振态为 ($\delta'_0 + \delta''_0, \delta'_1 + \delta''_1, \delta'_2 + \delta''_2, \delta'_3 + \delta''_3$)，用公式表示为：

$$\begin{bmatrix} \delta'_0 \\ \delta'_1 \\ \delta'_2 \\ \delta'_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta''_0 \\ \delta''_1 \\ \delta''_2 \\ \delta''_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta'_0 + \delta''_0 \\ \delta'_1 + \delta''_1 \\ \delta'_2 + \delta''_2 \\ \delta'_3 + \delta''_3 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

1.2.2 琼斯矢量

琼斯矢量是直接用 E_x 和 E_y 来表示光的偏振态，它是一个二维复矢量。对一束光 $\mathbf{E} = E_{0x} \cos(kz - \omega t + \varphi_x) \cdot \hat{i} + E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varphi_y) \cdot \hat{j}$ ，它的琼斯矢量定义为：

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} = E_{0x} e^{i\varphi_x} \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{E_{0y}}{E_{0x}} e^{i\varepsilon} \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

实际应用中常常不需要知道具体的振幅的相位，只需要知道相对相位差 $\varepsilon = \varphi_y - \varphi_x$ 即可，因此琼斯矢量也常用归一化的方式来表达。下图列出了常见偏振态的斯托克斯和琼斯矢量表示：

偏振态	斯托克斯矢量	琼斯矢量	偏振态	斯托克斯矢量	琼斯矢量
水平 \mathcal{P} 态	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	-45° 的 \mathcal{P} 态	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$
垂直 \mathcal{P} 态	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	\mathcal{R} 态	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$
$+45^\circ$ 的 \mathcal{P} 态	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	\mathcal{L} 态	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$

图 1.3: 常见偏振态的斯托克斯和琼斯矢量表示

上图的圆偏振可以轻松的扩展到椭圆，例如一个右旋椭圆的偏振态可表示为 $\mathbf{E} = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{bmatrix} 2 \\ -i \end{bmatrix}$ 。

与斯托克斯参量类似，光偏振态的合成也可以直接在琼斯矢量下进行，即直接将两个琼斯矢量相加即可。例如相同振幅的 \mathcal{R} 态和 \mathcal{L} 态可以合成为水平的 \mathcal{P} 态：

$$\mathbf{E}_{\mathcal{R}} + \mathbf{E}_{\mathcal{L}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

特别地，当两束光的琼斯矢量相互垂直时，称两个偏振态正交。由于琼斯矢量是复矢量，因此正交不是内积而是 Hermitian 内积，即 $\langle \mathbf{E}_1 | \mathbf{E}_2 \rangle = \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^*$ 。例如 \mathcal{R} 态和 \mathcal{L} 态是正交的、水平 \mathcal{P} 态 (记作 \mathcal{H}) 和垂直 \mathcal{P} 态 (记作 \mathcal{V}) 也是正交的：

$$\mathbf{E}_{\mathcal{R}} \cdot \mathbf{E}_{\mathcal{L}}^* = \left\langle \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \middle| \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}^* \right\rangle = 1 + i^2 = 0, \quad \mathbf{E}_{\mathcal{H}} \cdot \mathbf{E}_{\mathcal{V}}^* = \left\langle \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \middle| \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^* \right\rangle = 0 \quad (1.17)$$

由线性代数的知识知道，任何偏振态（即琼斯矢量）都可以由这样的一组正交偏振态合成得到，这也验证了我们之前对自然光“可分解为相位差迅速随机变化的两线偏振光”表述的合理性。

1.2.3 琼斯矩阵和穆勒矩阵

偏振器件对光的作用可以直接由矩阵来描述，常记作 \mathcal{A} ：

$$\mathbf{E}_t = \mathcal{A} \mathbf{E}_i \quad (1.18)$$

相应地，多个偏振器作用于同一光束时，设第一个通过的是 \mathcal{A} ，按矩阵乘法有：

$$\mathbf{E}_t = \mathcal{A}_n \mathcal{A}_{n-1} \cdots \mathcal{A}_2 \mathcal{A}_1 \mathbf{E}_i \quad (1.19)$$

图 1.4 给出了常见偏振器的琼斯矩阵和穆勒矩阵。需要指出，我们指介绍了矩阵方法较重要的一些内容，对这个专题的完备讨论远远超出了本课程的范围。

线性光学元件	琼斯矩阵	穆勒矩阵
水平的线起偏器 \leftrightarrow	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
铅直的线起偏器 \updownarrow	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
+45°的线起偏器 \nearrow	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
-45°的线起偏器 \nwarrow	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
四分之一波片, 快轴铅直	$e^{i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
四分之一波片, 快轴水平	$e^{i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$
同质右旋圆起偏器 \odot	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
同质左旋圆起偏器 \ominus	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

图 1.4: 常见偏振器的琼斯矩阵和穆勒矩阵

§ 1.3 双折射

1.3.1 双折射现象

一些特殊的晶体是光学各向异性的，最直接的表现是双折射。双折射是指光在晶体中传播时，不同偏振态（即不同电矢量）的光有不同的折射率，因此会有不同的折射角。这种具有两个（两套）折射率的性质称为双折射。

这样的晶体一般都有一个特殊方向（称为光轴），当光沿此方向入射时，无论偏振态如何，都不会发生双折射，退化到普通入射现象，称为单轴晶体。当光线的传播方向 \mathbf{k} 确定时，与光轴垂直的分量称为 o 光，平行的分量称为 e 光（ o 和 e 正交）。对于单轴晶体， o 光和 e 光的折射率是不同的，准确的说， o 光的折射率是一个常数，而 e 光的折射率是与光轴夹角 θ 的函数（在光轴方向上 $n_e(\theta) = n_o$ ）。由不同方向上折射率大小构成的曲面是一个椭球面，称为折射率椭球。 $n_{e0} < n_o$ 的单轴晶体称为负晶体（等价于 $v_o < v_e$ ），

$n_{e0} > n_o$ ($v_o > v_e$) 的称为正晶体。

以光轴为 z 轴，则单轴晶体的折射率椭球可写为：

$$\frac{x^2 + y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (1.20)$$

为了研究较一般的情况，我们先给出主截面和入射面的概念：

- (1) 主截面：介质表面法线与光轴共同构成的平面；
- (2) 入射面：介质表面法线与入射光线构成的平面。

当入射面和主截面重合时（入射光线在主截面）内，折射的 o 光和 e 光都在主截面内，可由惠更斯原理推出 o 光和 e 光各自的折射方向，如下图所示：

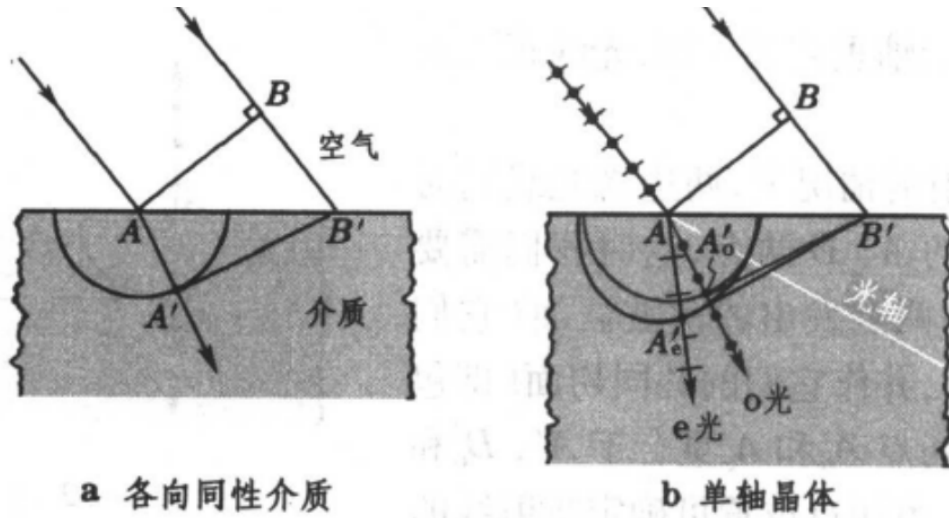


图 1.5: 用惠更斯作图法求折射线

下面讨论几种特殊的情况：

- (1) 光轴垂直于表面，光线正入射（图 1.6 (a)）： $n_o = n_e(\theta)$ ，没有发生双折射。
- (2) 光轴平行于表面，光线正入射（图 1.6 (b)）： $n_o \neq n_e(\theta)$ ，尽管两光方向相同，但波速不同（这会引引起相位差，将在后文提到），发生了双折射。
- (3) 光轴垂直于入射面，光线斜入射（图 1.6 (c)）： $n_o \neq n_e(\theta)$ ，两光方向和波速都不同。

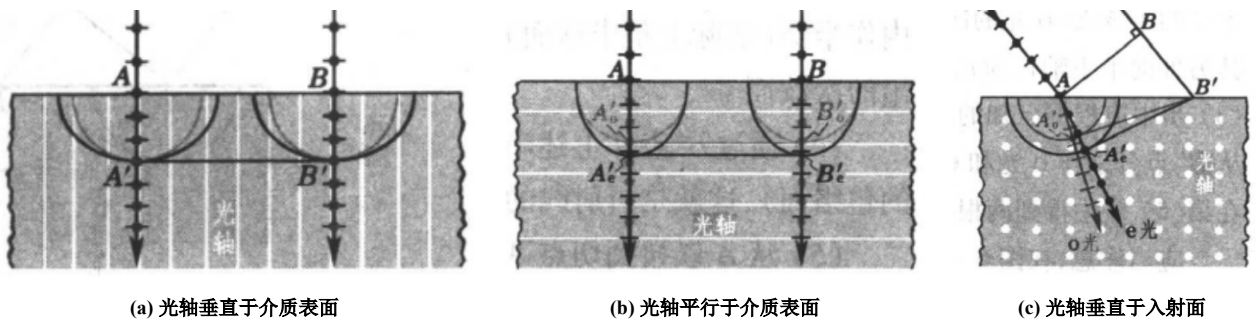
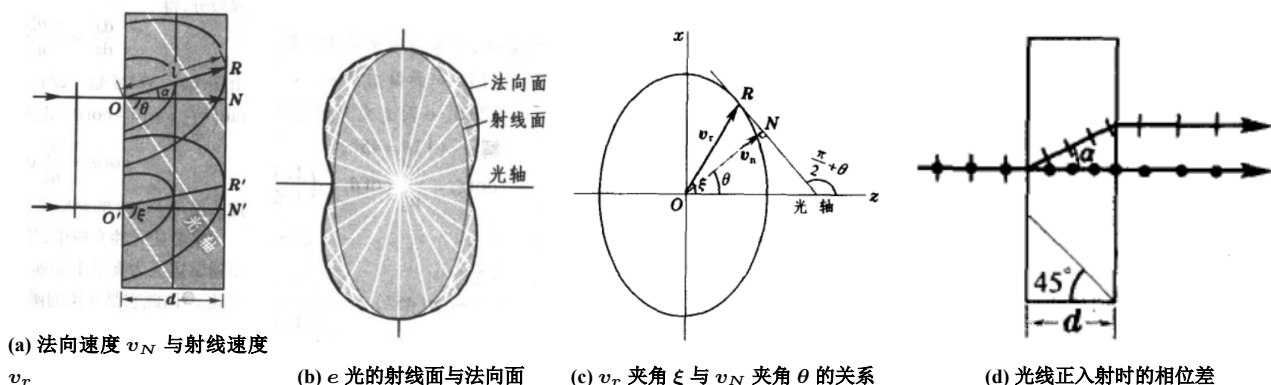


图 1.6: 不同情形下 o 光与 e 光的行为

设 θ 是折射 o 光与光轴的夹角， ξ 是折射 e 光与光轴的夹角，则法向折射率 n_N ：

$$\cot \xi = \frac{n_e^2}{n_o^2} \cot \theta, \quad n_N = n_N(\theta) = \sqrt{\frac{n_o^2 n_e^2}{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}} \quad (1.21)$$

由上面两个公式可以分别确定法向折射率 n 和 ξ ，而 ξ 又可以确定 e 光的折射方向。需要注意，上式中的 n_N 是法向折射率，如图 1.7 (d)，对于正入射， o 光和 e 光的光程差是 $\Delta L = n_N(\theta)d - n_o d$ ，而不是 $n_N(\theta)\frac{d}{\cos \alpha} - n_o d$ 。后一种应该用射线折射率 $n_r = n_r(\xi)$ 。

图 1.7: e 光折射方向与光程差

为了继承原有的惯性思维（沿光线传播方向上的折射率），我们推荐使用 n_r 而不是 n_N ，如下：

$$\cot \xi = \frac{n_e^2}{n_o^2} \cot \theta, \quad n_r = n_r(\theta) = \cos \alpha \sqrt{\frac{n_o^2 n_e^2}{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}} = \cos(\xi - \theta) \sqrt{\frac{n_o^2 n_e^2}{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}} \quad (1.22)$$

此时图 1.7 (d) 中的光程差便是直觉上的 $\Delta L = n_r \frac{d}{\cos \alpha} - n_o d$ 。^①

1.3.2 相位延迟片

再回来思考图 1.6 (b) 中发生的情况： e 光和 o 光方向都不变，但是它们的光程却不同，相位延迟片便是这样构成的。 o 光相对于 e 光的相位增量是：

$$\Delta \phi_o = \phi_o - \phi_e = (n_o - n_e)d \quad (1.23)$$

这样便可以用先前的 ε 来判断相位延迟片（又称波晶片）对偏振态的影响。最常用的波晶片是四分之一波片（简称 $\frac{\lambda}{4}$ 片），对应 $\Delta \phi_o = \frac{\pi}{2}$ 。

不能混淆的是，一些教材喜欢用“落后”或“领先”来表达这样的相位关系，尽管我们不提倡，但还是要指明，在 $(kz - \omega t)$ 的情形中，相位增加 $\Delta \phi_o$ （即 $(kz - \omega t + \Delta \phi_o)$ ）意味着延迟（落后）。

现在我们把各种光经过四分之一波片后偏振态的变化做一个总结，如下图所示：

入射光	$\lambda/4$ 片光轴取向	出射光
线偏振	e 轴或 o 轴与偏振方向一致*	线偏振
	e 轴或 o 轴与偏振方向成 45° 角	圆偏振
	其它取向	椭圆偏振
圆偏振	任何取向	线偏振
椭圆偏振	e 轴或 o 轴与椭圆主轴一致	线偏振
	其它取向	椭圆偏振

图 1.8: 偏振光经过四分之一波片后偏振态的变化

^①这一节如果不好理解，可以到网址 [here](#) 观看视频的 11:00 - 12:00 部分，在动画的帮助下很快能懂。

1.3.3 偏振光的检验

检验入射光到底是哪种偏振态，只需要一个偏振片和一个四分之一波片，具体方法如下图所示：

第 一 步	令入射光通过偏振片 I ,改变偏振片 I 的透振方向 P_1 , 观察透光强度的变化(图 6 - 58a)				
观察到的现象	有消光	强度无变化		强度有变化,但无消光	
结 论	线偏振	自然光或圆偏振		部分偏振或椭圆偏振	
第 二 步	a. 令入射光依次通过 $\lambda/4$ 片和偏振片 II ,改 变偏振片 II 的透振方 向 P_2 ,观察透射光的强 度变化(6 - 58b)			b. 同 a,只是 $\lambda/4$ 片的 光轴方向必须与第一 步中偏振片 I 产生的 强度极大或极小的透 振方向重合	
	观察到的现象		有消光	无消光	有消光
结 论		圆偏振	自然光	椭圆偏振	部分偏振

图 1.9: 偏振光的检验