

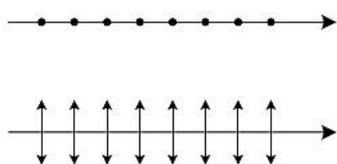
# 偏振光实验

波动是物质和能量运动的基本形式，自然界波动分为横波和纵波。根据光的电磁理论，在无源、无限扩展的均匀各向同性介质中传播的光波是横波，由于光波同物质相互作用时，起主要作用的是电场，因此一般以电矢量作为光波的振动矢量，其振动方向相对于传播方向的一种空间取向称为偏振，光的偏振现象是横波的特征。

偏振光的理论意义和价值在于证明了光是横波，同时，偏振光在现代技术领域得到了广泛的应用：如偏振现象应用在摄影技术中可大大减小反射光的影响，利用偏振现象可以制作3D电影、液晶屏、防眩车灯等，利用光的偏振可以构建矢量光场，用于光学成像、模式识别、光通信、传感和检测等相关领域，大大提升光信息处理和应用能力。

## 【实验原理】

光学中把电场强度  $E$  称为光矢量，在垂直与光波传播方向的平面内，光矢量可能有不同的振动方向，通常把光矢量保持一定振动方向的状态称为偏振态。如果光在传播过程中，光矢量保持在固定平面上振动，这种状态称为平面偏振态，此平面称为振动面（如图1）。此时，光矢量在垂直于传播方向的平面上投影为一条直线，故又称为线偏振态。若光矢量绕着传播方向旋转，矢量端点描绘的轨迹为一个圆，这种偏振态为圆偏振态；若矢量端点旋转的描绘的轨迹为一椭圆，即为椭圆偏振态（如图2）。



(a) 电矢量垂直于纸面的平面偏振光  
(b) 电矢量平行于纸面的平面偏振光

图1 平面偏振光

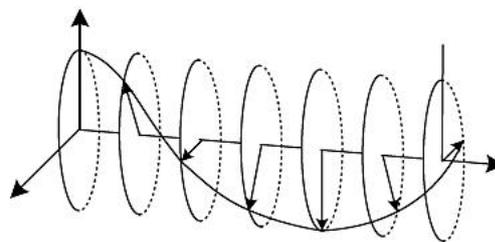


图2 椭圆偏振光

光源发射的光是由大量分子或原子辐射构成的，单个原子或分子辐射的光是偏振的，由于大量原子或分子的热运动和辐射的随机性，它们所发射的光的振动面出现在各个方向的几率是相同的。一般说，在  $10^{-6}$  秒内各个方向电矢量的时间平均值相等，故这种光源发射的光对外不显现偏振的性质，称为自然光。自然光不能直接显示出偏振现象，但自然光看成两个振幅相同、振动互相垂直且非相干的平面偏振光的叠加。一个平面偏振光与自然光相混合，可以获得部分偏振光，平面偏振光的振动方向，就是这个部分偏振光的振幅最大方向。

## 1、获得偏振光的方法

(1) 非金属镜面的反射。当自然光从空气照射在折射率为  $n$  的非金属镜面（如玻璃、水等）上，反射光与折射光都将成为部分偏振光。当入射角增大到某一特定值  $\phi_0$  时，镜面反射光成为完全偏振光，其振动面垂直于射面，这时入射角  $\phi_0$  称为布儒斯特角，也称起偏振角，由布儒斯特定律得：

$$\tan \phi_0 = n \quad (1)$$

其中， $n$  为折射率。

(2) 多层玻璃片的折射。

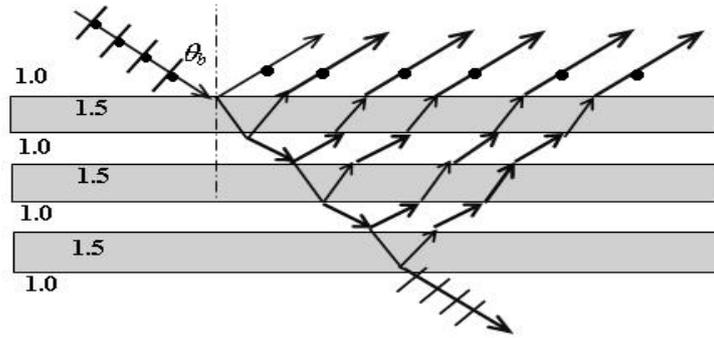


图 3 用多层玻璃片堆产生线偏振光

当自然光以布儒斯特角入射到叠在一起的多层平行玻璃片上时,经过多次反射后透过的光就近似于线偏振光,其振动在入射面内。由多层玻璃片组成的这种透射起偏器又称为玻璃片堆。

(3) 利用单轴晶体的双折射,所产生的寻常光( $o$ 光)和非常光( $e$ 光)都是线偏振光。前者的 $E$ 垂直于 $o$ 光的主平面(晶体内部某条光线与光轴构成的平面),后者的 $E$ 平行于 $e$ 光的主平面。波晶片是从单轴晶体中切割下来的平面平行板,其表面平行于光轴。

(4) 用偏振片可以得到一定程度的线偏振光。

## 2、偏振片、波片及其作用

### (1) 偏振片

偏振片是利用某些有机化合物晶体的二向色性,将其渗入透明塑料薄膜中,经定向控制而成。它能吸收某一方向振动的光,而透过与此垂直方向振动的光,由于在应用时起的作用不同而叫法不同,用来产生偏振光的偏振片叫做起偏器,用来检验偏振光的偏振片叫做检偏器。按照马吕斯定律,强度为 $I_0$ 的线偏振光通过检偏器后,透射光的强度为:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2)$$

式中 $\theta$ 为入射偏振光的偏振方向与检偏器偏振化方向之间的夹角。显然,当以光线传播方向为轴转动检偏器时,透射光强度 $I$ 发生周期性变化。当 $\theta = 0^\circ$ 时,透射光强最大;当 $\theta = 90^\circ$ 时,透射光强为极小值(消光状态);当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时,透射光强介于最大和最小之间。

自然光通过起偏器后可变为线偏振光,线偏振光振动方向与起偏器的透光轴方向一致。因此,如果检偏器的透光轴与起偏器的透光轴平行,则在检偏器后面可看到一定光强,如果二者垂直时,则无光透过,如图 4 所示。其中(a)图为起偏器透光轴 $P_1$ 与检偏器透光轴 $P_2$ 平行的情况;(b)图为起偏器透光轴 $P_1$ 与检偏器透光轴 $P_2$ 垂直的情况。此时透射光强为零,此种现象称为消光。在实验中要经常利用“消光”现象来判断光的偏振状态。

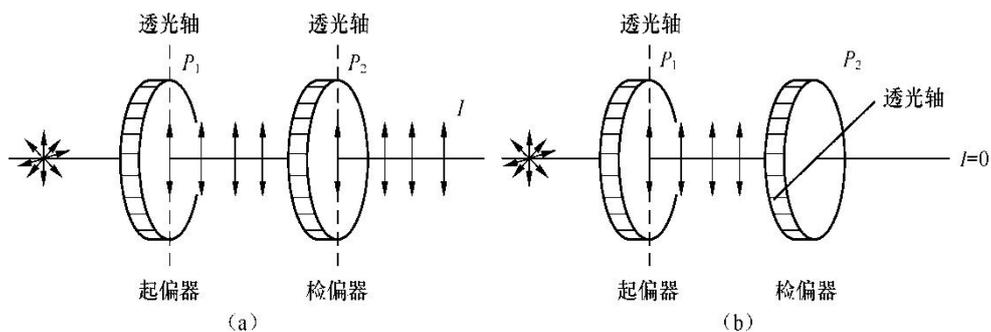


图 4 偏振光

## (2) 波片

波片也称相位延迟片，是由晶体制成的厚度均匀的薄片，其光轴与薄片表面平行，它能使晶片内的 o 光和 e 光通过晶片后产生附加相位差。根据薄片的厚度不同，可以分为  $1/2$  波长片， $1/4$  波长片等。

当线偏振光垂直射到厚度为  $L$ ，表面平行于自身光轴的单轴晶片时，则寻常光（o 光）和非常光（e 光）沿同一方面前进，但传播的速度不同。这两种偏振光通过晶片后，它们的相位差  $\varphi$  为：

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)L \quad (3)$$

其中， $\lambda$  为入射偏振光在真空中的波长， $n_o$ 、 $n_e$  分别为晶片对 o 光 e 光的折射率， $L$  为晶片的厚度。

两个互相垂直的，同频率且有固定相位差的简谐振动，可用下列方程表示（通过晶片后 o 光和 e 光的振动）：

$$\begin{cases} X = A_e \sin \omega t \\ Y = A_o \sin(\omega t + \varphi) \end{cases}$$

从两式中消去  $t$ ，经三角运算后得到全振动的方程式为：

$$\frac{X^2}{A_e^2} + \frac{Y^2}{A_o^2} + \frac{2XY}{A_e A_o} \cos \varphi = \sin^2 \varphi \quad (4)$$

由(4)式可知：

- ①  $\varphi = k\pi$  ( $k=0, 1, 2, \dots$ ) 时，为线偏振光。
- ②  $\varphi = (2k+1)\frac{\pi}{2}$  ( $k=0, 1, 2, \dots$ ) 时，为正椭圆偏振光。在  $A_o = A_e$  时，为圆偏振光。
- ③  $\varphi$  为其他值时，为椭圆偏振光。

在某一波长的线偏振光垂直入射于晶片的情况下，能使 o 光和 e 光产生相位差  $\varphi = (2k+1)\pi$ （相当于光程差为  $\lambda/2$  的奇数倍）的晶片，称为对应于该单色光的二分之一波片（ $\lambda/2$  波片）；

与此相似，能使 o 光和 e 光产生相位  $\varphi = (2k+1)\frac{\pi}{2}$ （相当于光程差为  $\lambda/4$  的奇数倍）的晶片，称为四分之一波片（ $\lambda/4$  波片）。

波片的定义，是相对于所用光源的波长而言的。

当振幅为  $A$  的线偏振光垂直入射到  $\lambda/4$  波片上，振动方向与波片光轴成  $\theta$  角时，由于 o 光和 e 光的振幅分别为  $A \sin \theta$  和  $A \cos \theta$ ，所以通过  $\lambda/4$  波片后合成的偏振状态也随角度  $\theta$  的变化而不同。

- ① 当  $\theta = 0^\circ$  时，获得振动方向平行于光轴的线偏振光。
- ② 当  $\theta = \frac{\pi}{2}$  时，获得振动方向垂直于光轴的线偏振光。
- ③ 当  $\theta = \frac{\pi}{4}$  时， $A_o = A_e$  获得圆偏振光。
- ④ 当  $\theta$  为其他值时，经过  $\lambda/4$  波片后为椭圆偏振光。

## 3、椭圆偏振光的测量

椭圆偏振光的测量包括长、短轴之比及长、短轴方位的测定。当检偏器方位与椭圆长轴的夹角为  $\varphi$  时，则透射光强为：

$$I = A_1^2 \cos^2 \varphi + A_2^2 \sin^2 \varphi$$

当 $\varphi = k\pi$ 时

$$I = I_{\max} = A_1^2$$

当 $\varphi = (2k + 1)\frac{\pi}{2}$ 时

$$I = I_{\min} = A_2^2$$

则椭圆长短轴之比为

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}} \quad (5)$$

椭圆长轴的方位即为 $I_{\max}$ 的方位。

#### 4、光的五种偏振态辨别

第一步	让入射光通过偏振片 I, 旋转偏振片 I, 观察透射光强的变化				
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	自然光或圆偏振光		部分偏振光或椭圆偏振光	
第二步	令入射光依次通过四分之一波片和偏振片 II, 改变偏振片 II 的透振方向, 观察透射光的强度变化			同前, 只是四分之一波片的光轴方向须与第一步中偏振片 I 产生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	无消光
结论		圆偏振	自然光	椭圆偏振	部分偏振

#### 【实验内容】

##### 1. 鉴别自然光与偏振光

(1) 设计出检测自然光、线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光、部分偏振光的实验方法和步骤。

##### 2. 验证马吕斯定律

(1) 用偏振片 1 作为起偏器产生线偏振光, 用偏振片 2 作为检偏器透光, 用光电探测器探测光强, 用万用表测量光电压。固定起偏器, 旋转检偏器, 每转过  $10^\circ$  记录一次相应的光电压值, 共转  $180^\circ$ , 用计算机或在坐标纸上做出  $I_0 \sim \cos^2 \theta$  关系曲线。

##### 3. 研究 1/2 波片的作用

(1) 线偏振光通过 1/2 波片时的现象

先使起偏器 1 和检偏器 2 方向正交, 光屏上呈消光状态。然后固定起偏器, 在起偏器 1 和检偏器 2 之间插入 1/2 波片, 原有的消光被破坏, 光屏上有光强; 转动 1/2 波片至消光状态,

此时  $1/2$  波片的角度为初始角度  $\theta_0$ ，再将  $1/2$  波片从  $\theta_0$  开始旋转  $10^\circ$ ，破坏消光，再转动检偏器至消光位置，记下检偏器转过的角度。以此类推，每转动  $1/2$  波片  $10^\circ$ ，旋转检偏器达到消光，记下检偏器转过的角度。

数据记录

1/2 波片从初始角度 $\theta_0$ 开始转动的角度值	检偏器 2		
	起始位置角度值	转至消光位置角度值	检偏器转过的角度值
10			
20			
30			
...			
80			
90			

从上面实验结果可以得出什么规律？怎样解释这一规律。总结  $1/2$  波片在偏振光变换中的作用。

(2) 若检偏器 2 固定，将  $1/2$  波片旋转  $360^\circ$ ，能观察到几次消光？若  $1/2$  波片固定，将检偏器 2 旋转  $360^\circ$ ，能观察到几次消光？由此分析线偏振光通过  $1/2$  波片后，光的偏振态是怎样的？

#### 4. 用 $1/4$ 波片产生圆偏振光和椭圆偏振光

先使起偏器 1 和检偏器 2 正交消光，在两器件之间插入  $1/4$  波片，破坏消光；旋转  $1/4$  波片达到消光。再将  $1/4$  波片转动  $15^\circ$ ，然后再转动检偏器 2 一周，观察光屏上光强的变化。依次转过  $1/4$  波片  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、...、 $90^\circ$ ，每次对应转动检偏器 2 一周记录观察到的现象（如：消光、光强不变等）

数据及现象记录

1/4 波片转动的角度值	检偏器 2 的位置	观察到的现象	判断由 $1/4$ 波片出射光的偏振态
15			
30			
45			
60			
75			
90			

根据以上数据，总结产生椭圆偏振光和圆偏振光的方法。