

# 偏振光学实验

光是一种电磁波，其电矢量的振动方向垂直于传播方向，是横波。由于一般光源发光机制的无序性，其光波的电矢量的分布（方向和大小）对传播方向来说是对称的，称为自然光。当由于某种原因，使光线的电矢量分布对其传播方向不再对称时，我们称这种光线为偏振光。对于偏振现象的研究在光学发展史中有很重要的地位，光的偏振使人们对光的传播（反射、折射、吸收和散射）规律有了新的认识，并在光学计量、晶体性质研究和实验应力分析等技术部门有广泛的应用。

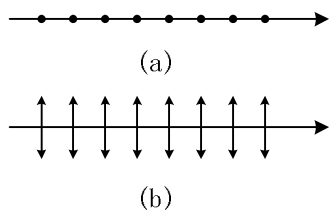
## 【实验目的】

1. 观察光的偏振现象，验证马吕斯定律；
2. 了解  $1/2$  波片、 $1/4$  波片的作用；
3. 掌握椭圆偏振光、圆偏振光的产生与检测。

## 【实验原理】

### 1. 光的偏振性

光是一种电磁波，由于电磁波对物质的作用主要是电场，故在光学中把电场强度  $E$  称为光矢量。在垂直于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上的状态称为偏振态。如果光在传播过程中，若光矢量保持在固定平面上振动，这种振动状态称为平面振动态，此平面就称为振动面（见图 1）。此时光矢量在垂直与传播方向平面上的投影为一条直线，故又称为线偏振态。若光矢量绕着传播方向旋转，其端点描绘的轨道为一个圆，这种偏振态称为圆偏振态。如光矢量端点旋转的轨迹为一椭圆，就成为椭圆偏振态（见图 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

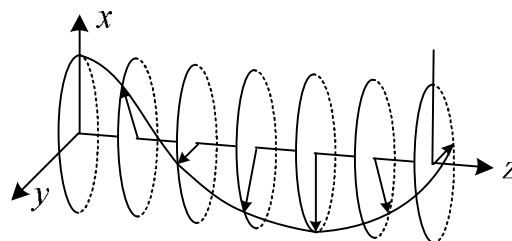


图 2 椭圆偏振光

普通光源发出的光一般是自然光，自然光不能直接显示出偏振现象。但自然光可以看成是两个振幅相同，振动相互垂直的非相干平面偏振光的叠加。在自然光与平面偏振光之间有一种部分偏振光，可以看作是一个平面偏振光与一个自然光混合而成的。其中的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。

### 2. 偏振片

虽然普通光源发出自然光，但在自然界中存在着各种偏振光，目前广泛使用的偏振光的器件是人造偏振片，它利用二向色性获得偏振光（有些各向同性介质，在某种作用下会呈现各向异性，能强烈吸收入射光矢量在某方向上的分量，而通过其垂直分量，从而使入射的自然光变为偏振光，介质的这种性质称为二向色性。）。

偏振器件即可以用来使自然光变为平面偏振光——起偏，也可以用来鉴别线偏振光、自然光和部分偏振光——检偏。用作起偏的偏振片叫做起偏器，用作检偏的偏振器件叫做检偏器。实际上，起偏器和检偏器是通用的。

### 3. 马吕斯定律

设两偏振片的透振方向之间的夹角为 $\alpha$ ，透过起偏器的线偏振光振幅为 $A_0$ ，则透过检偏器的线偏振光的振幅为 $A$

$$A = A_0 \cos \alpha$$

强度为 $I$

$$I = A_0^2 \cos^2 \alpha = I_0 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

式中 $I_0$ 为进入检偏器前（偏振片无吸收时）线偏振光的强度。

(1) 式是 1809 年马吕斯在实验中发现，所以称马吕斯定律。显然，以光线传播方向为轴，转动检偏器时，透射光强度 $I$ 将发生周期变化。若入射光是部分偏振光或椭圆偏振光，则极小值不为 0。若光强完全不变化，则入射光是自然光或圆偏振光。这样，根据透射光强度变化的情况，可将线偏振光和自然光和部分偏振光区别开来。

### 4. 椭圆偏振光、圆偏振光的产生；1/2 波片和 1/4 波片的作用

当线偏振光垂直射入一块表面平行于光轴的晶片时，若其振动面与晶片的光轴成 $\alpha$ 角，该线偏振光将分为 $e$ 光、 $o$ 光两部分，它们的传播方向一致，但振动方向平行于光轴的 $e$ 光与振动方向垂直于光轴的 $o$ 光在晶体中传播速度不同，因而产生的光程差为

$$\Delta = d(n_e - n_o)$$

位相差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_e - n_o) \quad (2)$$

式中 $n_e$ 为 $e$ 光的主折射率， $n_o$ 为 $o$ 光的主折射率（正晶体中， $\delta > 0$ ，在负晶体中 $\delta < 0$ ）。 $d$ 为晶体的厚度，如图 4 所示。当光刚刚穿过晶体时，此两光的振动可分别表示如下：

$$\begin{aligned} E_x &= A_o \cos \omega t \\ E_y &= A_e \cos(\omega t + \delta) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $A_e = A \cos \alpha$ ， $A_o = A \sin \alpha$ ，由 (3) 中的两式消去 $t$ ，得轨迹方程

$$\frac{E_x^2}{A_o^2} + \frac{E_y^2}{A_e^2} - 2 \frac{E_x E_y}{A_o A_e} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (4)$$

这是个一般的椭圆方程。

当改变厚度 $d$ 时，光程差 $\Delta$ 亦改变。

(1) 当 $\Delta = k\lambda$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ )，即 $\delta = 0$ 时，由 (4)

式可得

$$E_y = \frac{A_e}{A_o} E_x \quad (5)$$

这是直线方程，故出射光为平面偏振光，与原入射光振动方向相同，满足此条件之晶片叫全波片。光通过全波片不发生振动状态的变化。

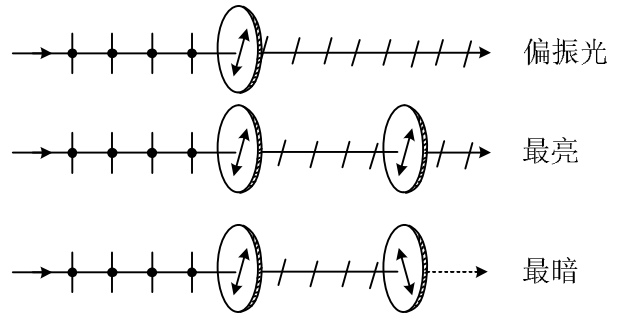


图 3 偏振片

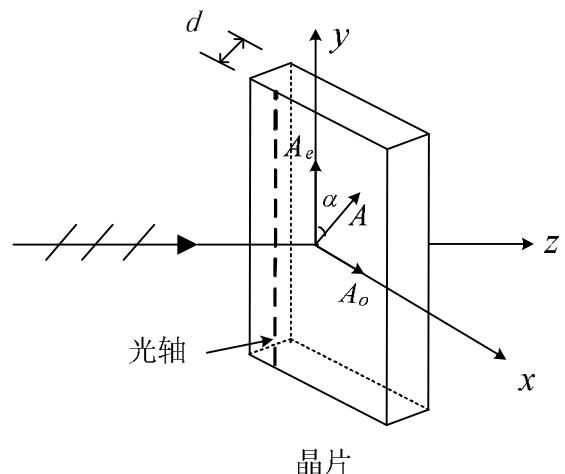


图 4 偏振光通过晶片的情形

(2) 当  $\Delta = (2k+1)\lambda/2$  ( $k=0,1,2,\dots$ ), 即  $\delta = \pi$  时, 由 (4) 式可得

$$E_y = -\frac{A_e}{A_o} E_x \quad (6)$$

出射光也是平面偏振光, 但与原入射光夹角为  $2\alpha$ , 满足此条件的晶片叫 1/2 波片, 或半波片, 平面偏振光通过半波片后, 振动面转过  $2\alpha$  角, 若  $\alpha = 45^\circ$ , 则出射光的振动面与入射光的振动面垂直。

(3) 当  $\Delta = (2k+1)\lambda/4$  ( $k=0,1,2,\dots$ ), 即  $\delta = \pm\pi/2$  时, 由 (4) 式可得

$$\frac{E_x^2}{A_o^2} + \frac{E_y^2}{A_e^2} = 1 \quad (7)$$

出射光为椭圆偏振光, 椭圆的两轴分别与晶体的主截面平行及垂直, 满足此条件的晶片叫 1/4 波片。1/4 波片是作偏振光实验重要的常用元件。

若  $A_e = A_o$ , 于是  $x^2 + y^2 = A^2$ , 出射光为圆偏振光。

由于  $o$  光和  $e$  光的振幅是  $\alpha$  的函数, 所以通过 1/4 波片后的合成偏振状态也将随角度  $\alpha$  变化而不同。

当  $\alpha = 0^\circ$  时, 出射光为振动方向平行 1/4 波片光轴的平面偏振光。

当  $\alpha = \pi/2$  时, 出射光为振动方向垂直于光轴的平面偏振光。

当  $\alpha = \pi/4$  时, 出射光为圆偏振光。

当  $\alpha$  为其它值时, 出射光为椭圆偏振光。

### 【实验仪器】

半导体激光器、碘钨灯、硅光电池、UT51 数字万用表、偏振片 (2 片)、1/2 波片、1/4 波片、反射镜、玻璃堆、平台和光具座等

### 【实验内容】

#### 1. 验证马吕斯定律

实验装置如图 5 所示, 光束经过起偏器产生线偏振光, 再透过检偏器射到硅光电池上, 转动检偏器 ( $360^\circ$ ) 观察光强的变化, 找到最大电流值 (对于硅光电池, 其短路电流与光源的光强呈很好的线性关系), 确定该位置为相对  $0^\circ$ 。实验时, 测量精度:  $5^\circ$ , 测量范围:  $-90^\circ \sim +90^\circ$ 。作  $I \sim \cos^2 \alpha$  的关系曲线, 验证马吕斯定律。

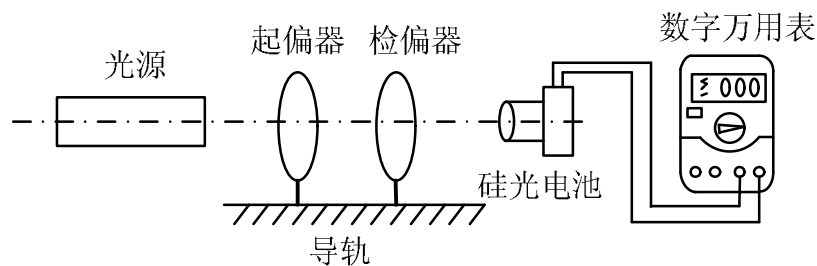


图 5 测定马吕斯定律的装置图

#### 2. 线偏振光通过 1/2 波片时的现象和 1/2 波片的作用。

在光具座上按图 6 放置各元件, 其中  $P$  为起偏器, 在未放入 1/2 波片时, 使  $A$  与  $P$  正交, 光屏

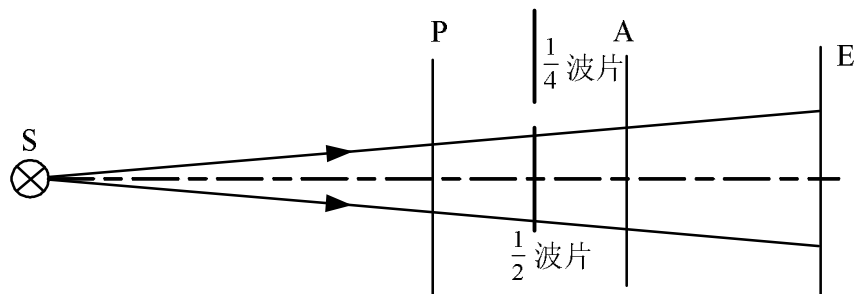


图6 观察波片作用的装置

上呈现消光现象。插入  $1/2$  波片后，转动  $1/2$  波片观察光屏。调节波片至呈现消光现象，此时为初始角度。再将  $1/2$  波片从初始位置转  $10^\circ$ ，破坏消光，然后转动  $A$  至消光位置。记下  $A$  所转过的角度。依次类推，每将转动  $1/2$  波片  $10^\circ$ ，记下达达到消光时  $A$  转过的角度。

数据记录表格如下：

|              |    |            |            |     |     |            |            |
|--------------|----|------------|------------|-----|-----|------------|------------|
| 1/2 波片转过角度   | 初始 | $10^\circ$ | $20^\circ$ | ... | ... | $80^\circ$ | $90^\circ$ |
| 检偏器 $A$ 转过角度 |    |            |            |     |     |            |            |

若检偏片  $A$  固定，将  $1/2$  波片转过  $360^\circ$ ，能观察到几次消光？若  $1/2$  波片固定，将  $A$  转过  $360^\circ$ ，能观察几次消光？由此分析线偏振光通过  $1/2$  波片后，光的偏振状态是怎样的？

### 3. 用 $1/4$ 波片产生圆偏振光和椭圆偏振光。

按图6装置，使  $P$  与  $A$  正交消光，用  $1/4$  波片代替  $1/2$  波片，转动  $1/4$  波片使光屏上呈现消光。再将  $1/4$  波片转动  $15^\circ$  然后转动  $A$  一周（即  $360^\circ$ ），观察光屏上光强的变化情况。依次转过  $1/4$  波片分别为  $15^\circ$ ， $30^\circ$ ， $\dots$ ， $90^\circ$ ，则每次对应转动检偏器  $A$  一周，记录观察到的现象（如消光，光强不变等）

现象记录如下：

| 1/4 波片转角度  | $A$ 的位置(转一周) | 观察到现象 | 判断由 $A$ 出射光的偏振性质 |
|------------|--------------|-------|------------------|
| $15^\circ$ |              |       |                  |
| $30^\circ$ |              |       |                  |
| ...        |              |       |                  |
| $90^\circ$ |              |       |                  |

### 4. 测量出射光强与 $1/4$ 波片和检偏器光轴之间的关系

(1) 保持起偏器光轴与  $1/4$  波片之间的夹角不变，调节检偏器，观察光屏上光强的变化。测量精度  $5^\circ$ ，测量范围：消光状态 — 消光状态。

选做：(2) 将调节起偏器角度变化  $40^\circ$ ， $1/4$  波片状态不变，重复以上测量。

### 5. 观察光的偏振现象

#### (1) 反射引起的偏振

图7中  $S$  为照明灯， $C$  为聚光镜， $M$  为黑色反光镜， $A$  为检偏器， $E$  为投影屏， $i_B$  为入射角。转动检偏器  $A_i$  可观察到屏上光强在最强和最小之间的变化，这表明反射光是部分偏振光。（选做：仔细调节入射角  $i$ ，找到最小光强为零，此时  $i = i_B$  为布儒斯特角，反射光是全偏振光。）

#### (2) 折射引起的偏振

如图8，用反射起偏一样的光源，发射的自然光以布儒斯特角入射玻璃堆上（有8块玻璃叠成），

其透射光经过检偏器且转动，观察光屏上光强的变化，它也是偏振光。

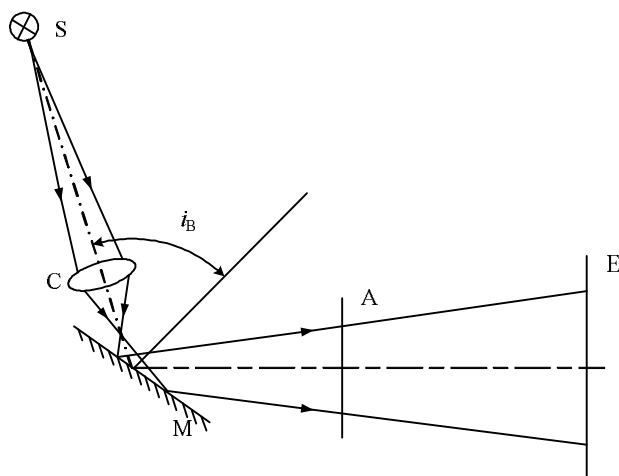


图7 反射起偏装置

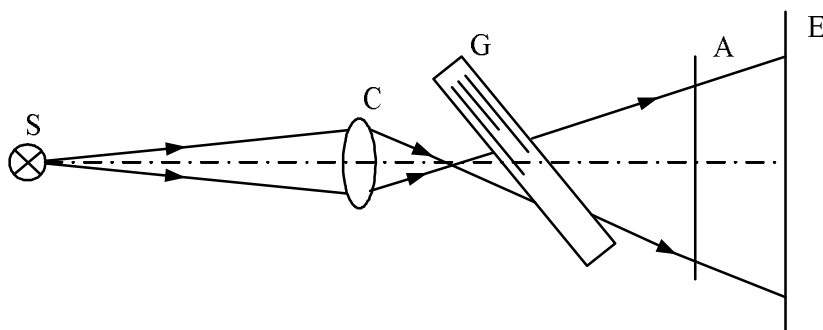


图8 折射起偏装置

**【预习题】**

1. 什么叫线偏振光？产生线偏振光的方法？
2. 什么叫 1/2 波片？它的作用如何？
3. 什么叫 1/4 波片？如何用 1/4 波片产生和检验圆偏振光和椭圆偏振光？

**【思考题】**

1. 求下列情况下理想起偏器和理想检偏器两个光轴之间的夹角为多少？
  - (1) 透射光是入射自然光强的 1/3。
  - (2) 透射光是最大透射光强度的 1/3。
2. 如果在互相正交的偏振片  $P_1$  和  $P_2$  中间插进一块 1/4 波片，使其光轴跟起偏器  $P_1$  的光轴平行，那么透过检偏器  $P_2$  的光斑是亮的？还是暗的？为什么？将  $P_2$  转动  $90^\circ$  后，光斑的亮暗是否变化？为什么？
3. 在第 2 题中用 1/2 波片代替 1/4 波片，情况如何？