



实验4、虚拟仿真实验— 偏振光的观察与研究

物理实验（一）

实验背景



Etienne Louis
Malus 1775-1812

- 马吕斯，法国物理学家及军事工程师。出生于巴黎，曾在工程兵部队中任职。1810年被选为巴黎科学院院士，曾获伦敦皇家学会奖章。1808年确定了马吕斯定律。他研究了光在晶体中的双折射现象，1811年，他与J.毕奥各自独立地发现折射时光的偏振，提出了确定晶体光轴的方法，研制成一系列偏振仪器。
- 布儒斯特，苏格兰物理学家。1800年毕业于爱丁堡大学，曾任“爱丁堡杂志”、“苏格兰杂志”、“爱丁堡百科全书”编辑，爱丁堡大学教授、校长等。1815年被选为皇家学会会员，1819年获冉福德奖章。布鲁斯特的最大贡献是在光学方面发展了“布鲁斯特定律”。

布儒斯特积极促进英国科学的发展，在他的倡导下，在1831年9月召开了名为“科学之友”的全国性会议，成立了“英国科学促进协会”

- 1811年偏振光取向的线性自转首先在石英中由法国物理学家吉恩·多米尼克观察到。在这同样时间附近，Baptiste Biot在有机物质液体和气体也观察了类似作用（例如松节油）。1822年，英国天文学家Joun F.W.Herschel发现石英的不同的晶形转动了线性极化用不同的方向。

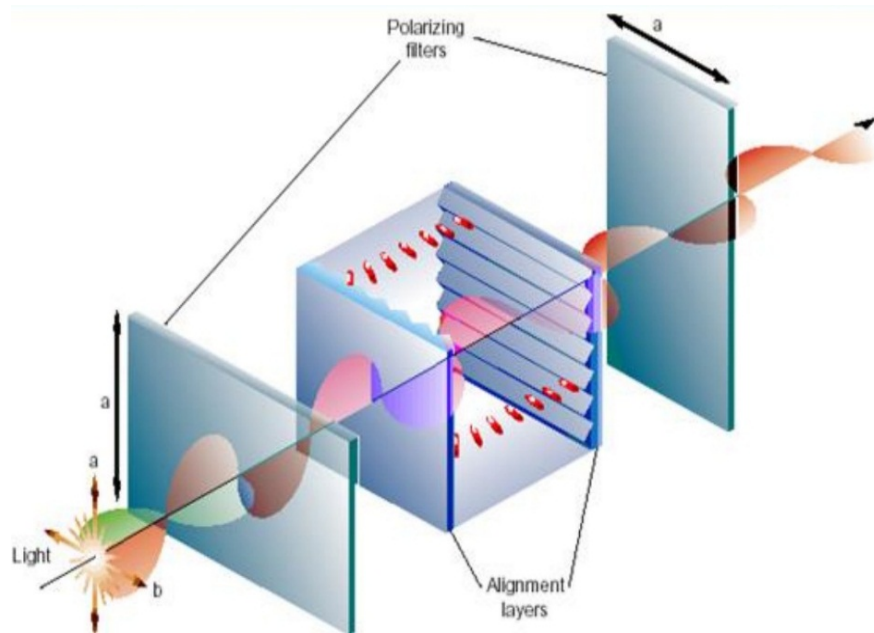
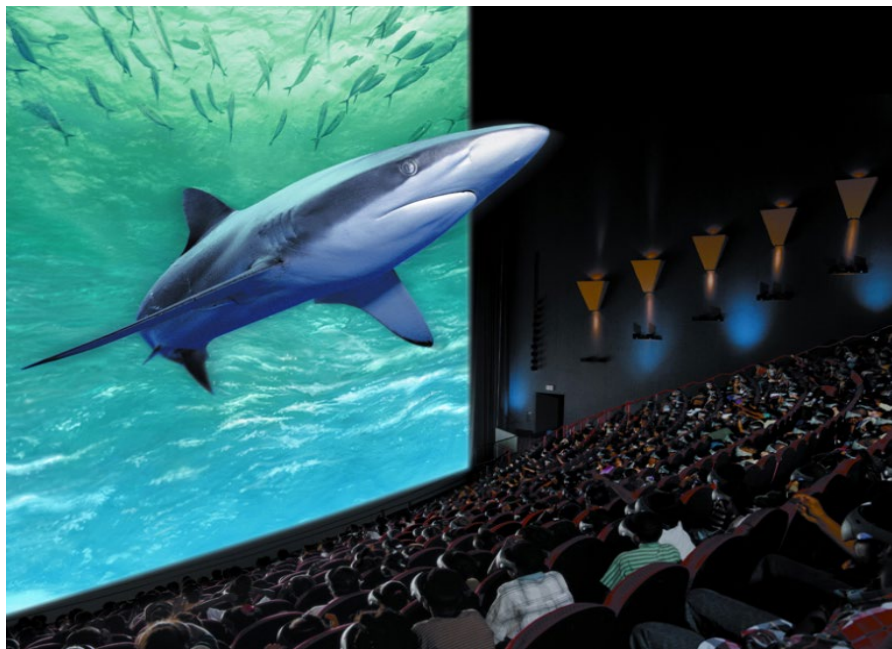


David Brewster
(1781—1868)

实验背景

- 多米尼克·弗朗索瓦·让·阿喇果，法国著名的物理学家、天文学家、测地学家和政治活动家。1811年，阿喇果（Arago）在研究石英晶体的双折射特性时发现：一束线偏振光沿石英晶体的光轴方向传播时，其振动平面会相对原方向转过一个角度。这就是**旋光现象**，也即**旋光效应**。

- ◆ 光的偏振在生活、生产、科研中有许多重要应用，如摄影、立体电影、液晶显示都用到了光的偏振。



Do-minique
Francois Jean
Arago (1785-1853)



一、实验目的

1. 了解光的横波性；
2. 了解光的几种偏振态；
3. 掌握起偏检偏的方法，验证马吕斯定律；
4. 研究1/4和1/2波片对偏振光的影响

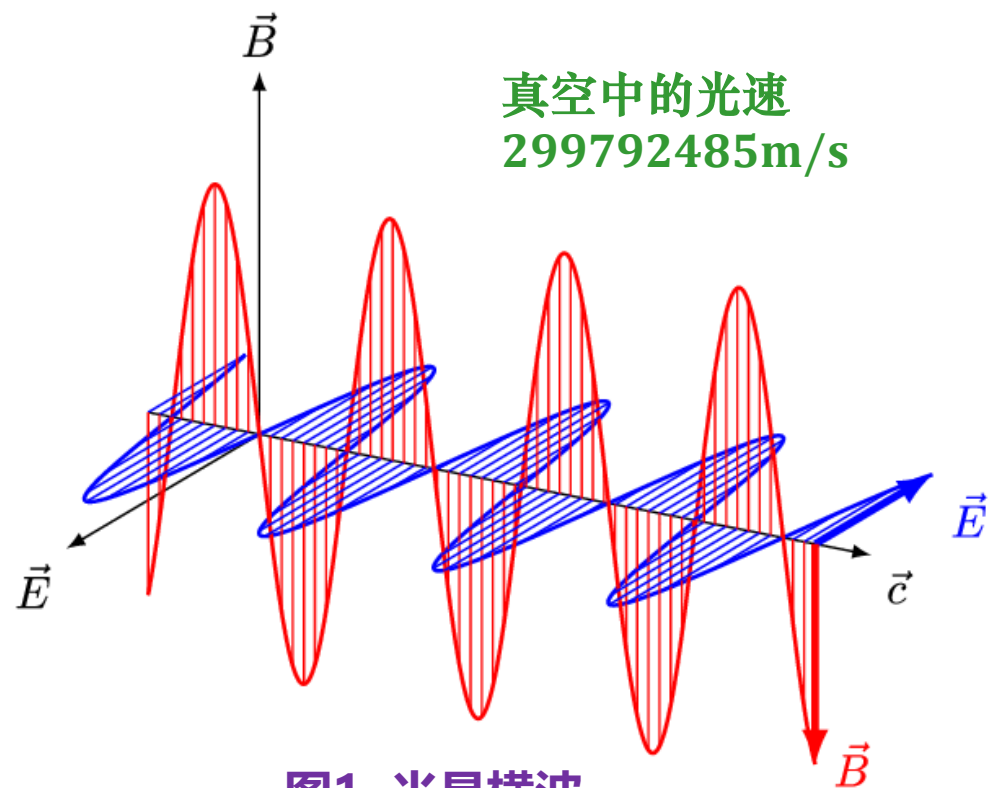


图1 光是横波

光是电磁波，光是横波，横波具有偏振特性。

二、实验仪器

1. 虚拟仿真实验系统地址: <http://aryun.ustcori.com:3230>

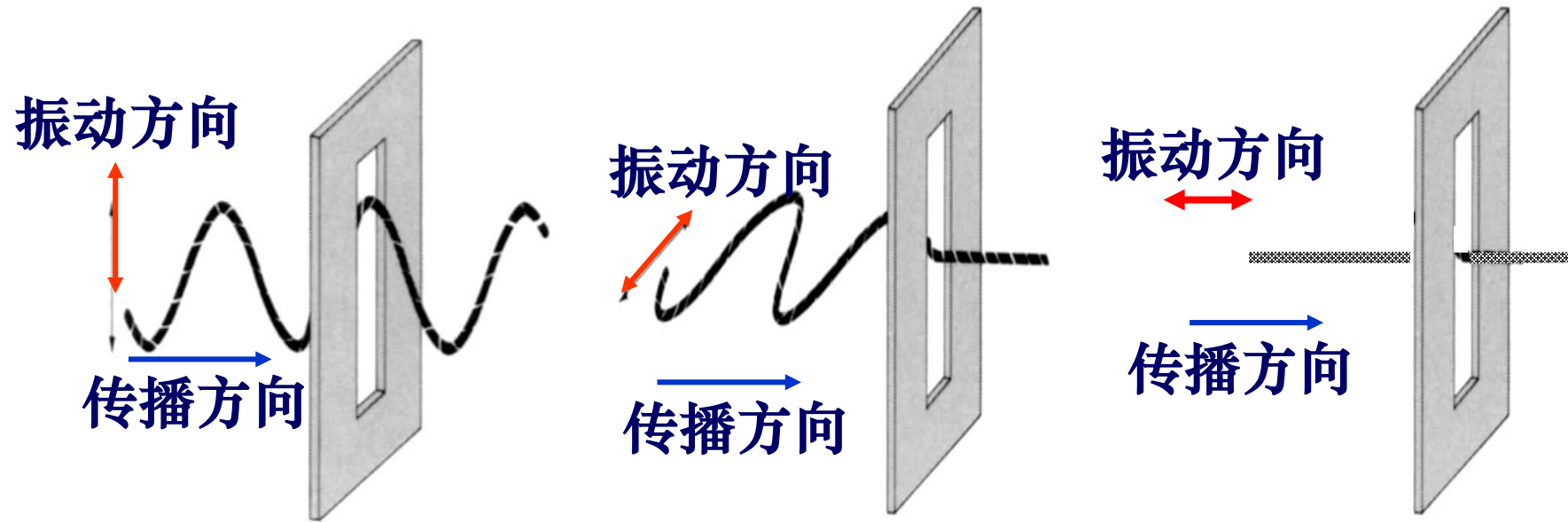
账号: SZDX+学号 (忽略加号), 密码: 自行设定

2. 偏振光的观察与研究

3. 实验仪器: 光源、偏振片、 $1/4$ 波片、 $1/2$ 波片、光屏

三、实验原理/ 3.1光的偏振性

光是电磁波，电磁波是横波，横波具有一个纵波没有的特性——偏振

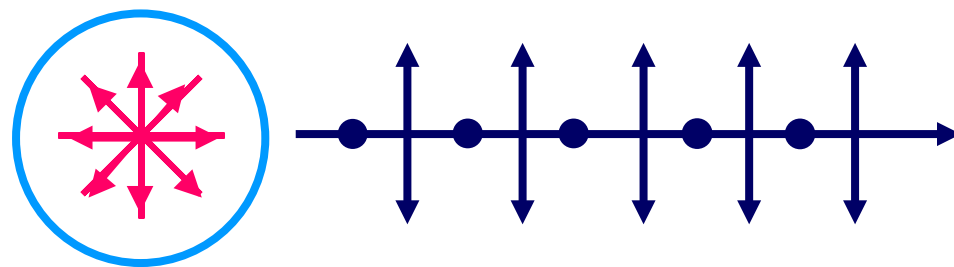
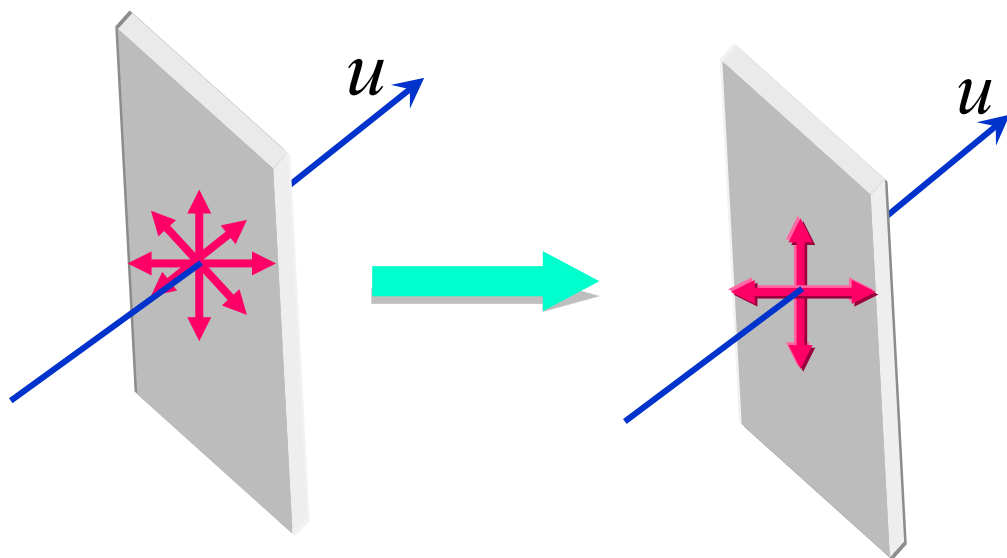


横波和纵波在偏振方面的区别

三、实验原理 / 3.2光的偏振状态

1、自然光：在与光传播方向垂直的平面内，光矢量沿各个方向的平均值相等。普通光源发光的是自然光

自然光可以分解成没有恒定相位差的互相垂直的两个光振动的传播

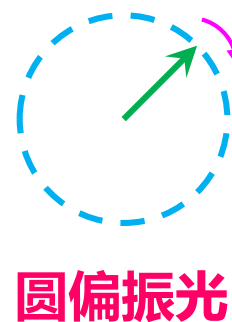
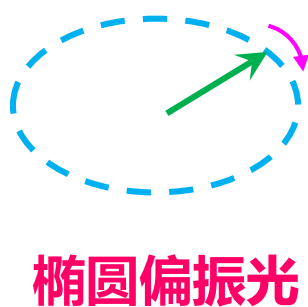
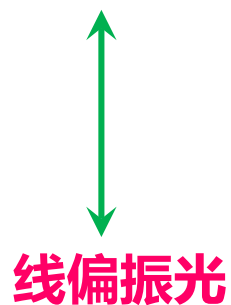
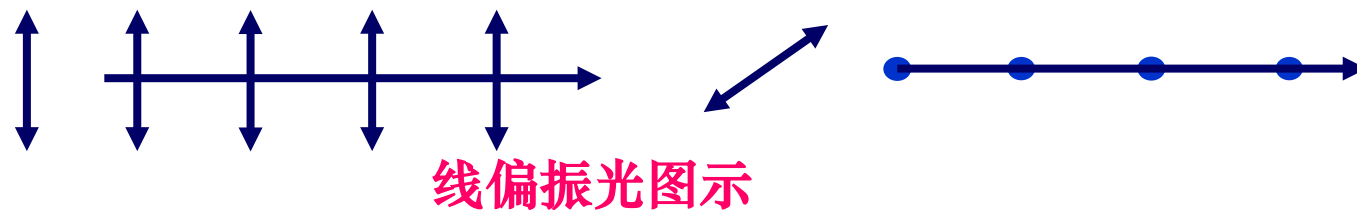


自然光图示

三、实验原理 / 3.2光的偏振状态

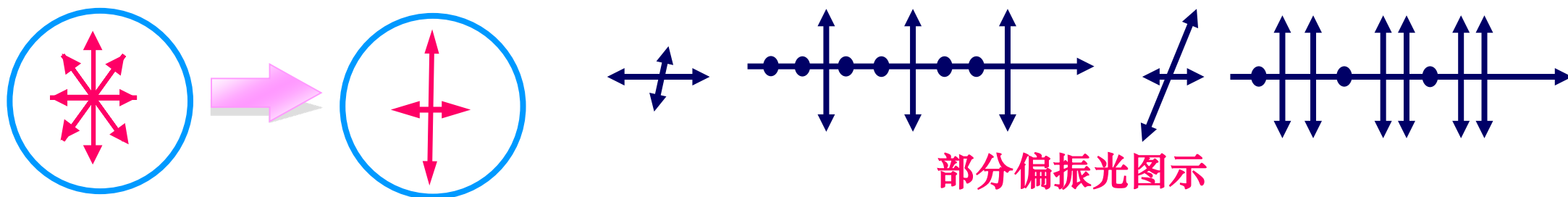
2、偏振光：自然光经过反射、吸收、折射后，可能会只保留某一方向的光振动或振动在某一方向较强，即偏振光。

(1)：线偏振光：振动只在某一方向上。

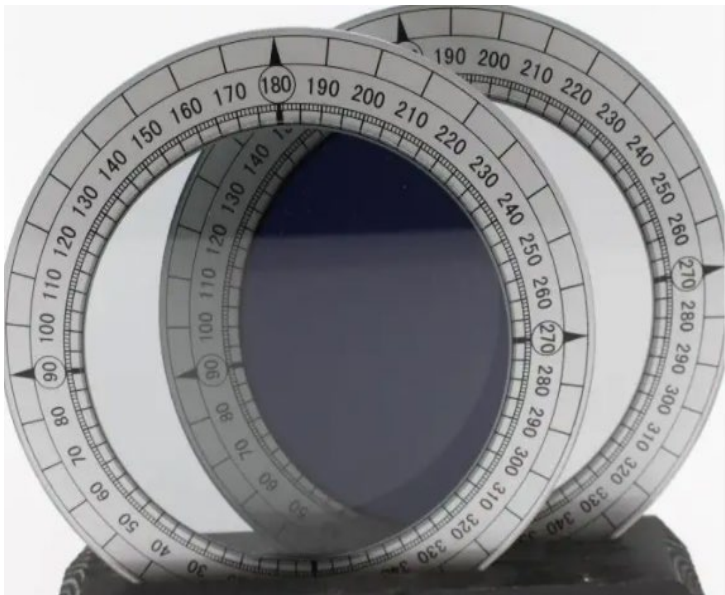


三、实验原理 / 3.2光的偏振状态

(2) **部分偏振光**：振动在某一方向上比其他方向较强。部分偏振光可分解为两束振动方向相互垂直的、不等幅的、不相干的线偏振光。



三、实验原理/ 3.3 偏振片 起偏与检偏

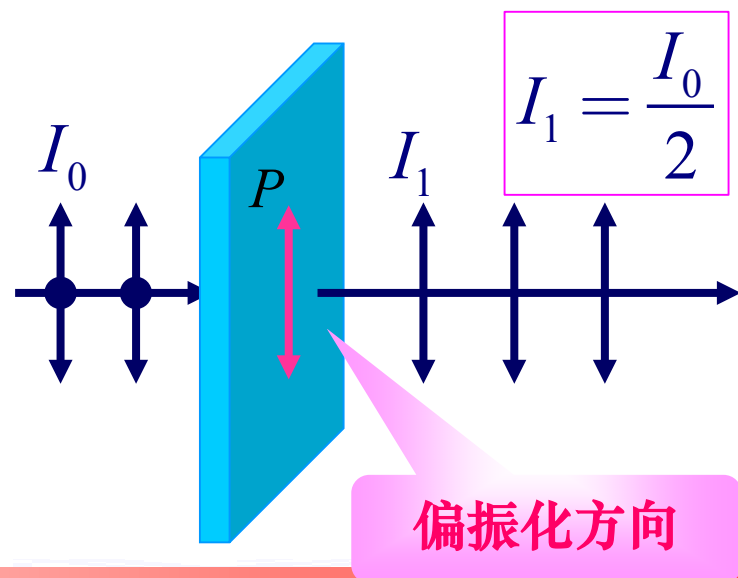


1、偏振片:有些有机晶体,如硫酸碘奎宁、电气石或聚乙烯醇薄膜在碘溶液中浸泡后,在高温下拉伸、烘干,然后粘在两个玻璃片之间就形成了偏振片。

偏振片有一个特定的方向(偏振化方向),只让平行与该方向的振动通过。

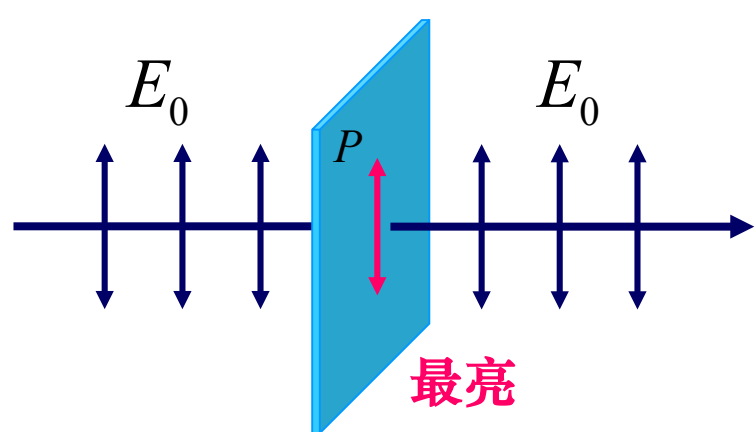
2、起偏:光通过偏振片后变成偏振光。

自然光经过偏振片后光强变为原来的一半,振动方向和偏振片的偏振化方向无关。

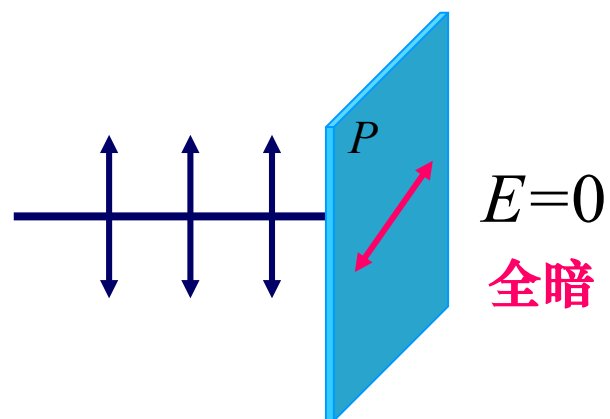


三、实验原理 / 3.3 偏振片 起偏与检偏

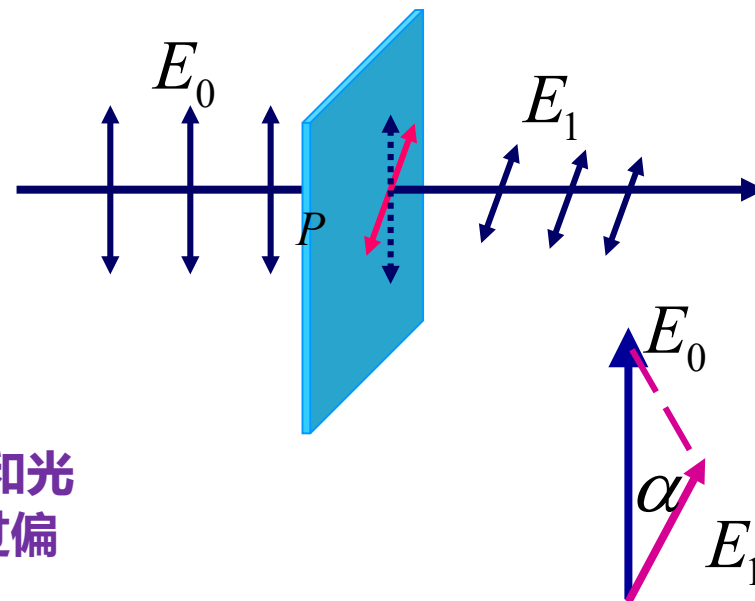
3、检偏：完全偏振光经过偏振片后，光强随偏振化方向不同而变化。



当偏振片的偏振化方向和光振动方向平行时，光通过偏振片后光强不变



当偏振片的偏振化方向和光振动方向垂直时，光不能通过偏振片，透过光强为零。

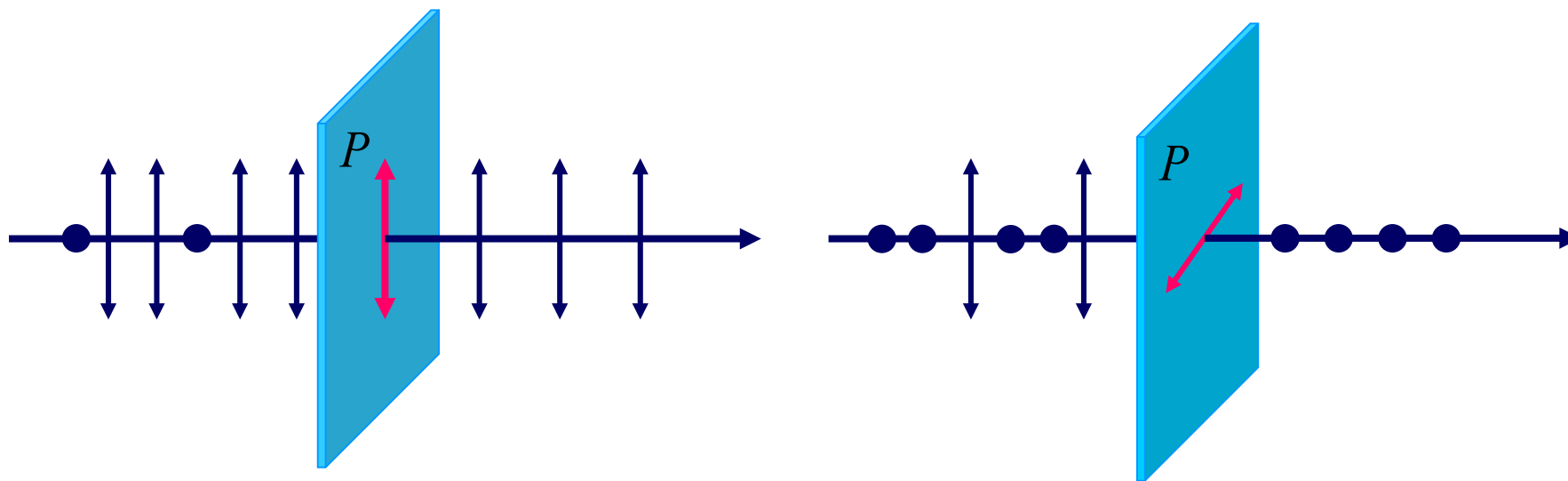


当偏振片的偏振化方向和光振动方向有夹角时，

$$E_1 = E_0 \cos \alpha \quad I_1 = I_0 \cos^2 \alpha \text{ —— 马吕斯定律}$$

三、实验原理/ 3.3 偏振片 起偏与检偏

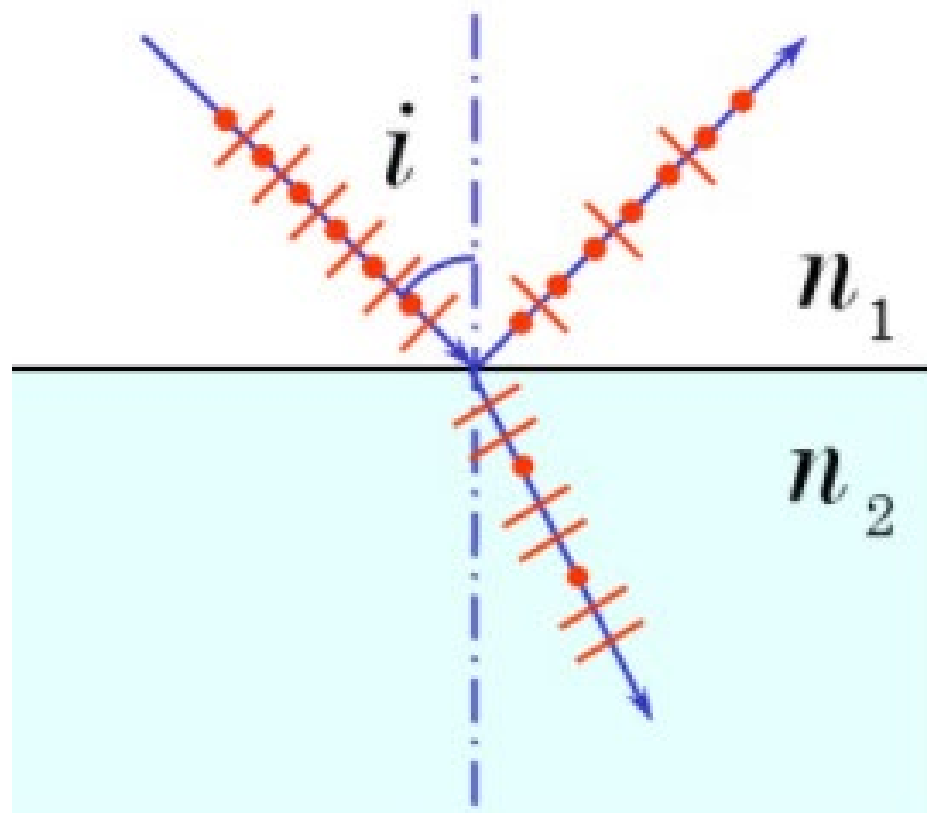
部分偏振光经过偏振片后，光强随偏振化方向不同而变化，但不会有全暗。



三、实验原理/ 3.3 偏振片 起偏与检偏（布儒斯特定律）

布儒斯特于 1815 年发现：自然光在电介质界面上反射和折射时，一般情况下反射光和折射光都是**部分偏振光**，当入射角为某特定角时反射光是线偏振光，其振动方向与入射面垂直，此特定角称为**布儒斯特角**或**起偏角**，用 i_b 表示。此规律称为布儒斯特定律。光以布儒斯特角入射时，反射光与折射光互相**垂直**。

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



反射光：
垂直入射
面的振动
占优

透射光：
平行入射
面的振动
占优



三、实验原理/ 3.4 波片

将一束平面偏振光垂直入射到具有双折射的晶片上，光波被分成两束振动方向互相垂直的平面偏振光，其中一束比另一束较快通过晶体，当射出晶片时，两束光波产生一个相位差。

波片：能使相互垂直的两振动分量间产生附加光程差（相位差）的光学元件。通常由具有精确厚度的石英、方解石等双折射晶片制成。相位差是利用不同偏振方向的光在晶体中的传播速度不同来实现的。传播速度较大(v_e)的振动方向成为快轴，传播速度较小(v_o)的振动方向称为慢轴（o光和e光取决于晶体类型）。设快轴和慢轴对应的折射率分别为 n_e 和 n_o ，波片的厚度为 d ，则光束通过波片后的光程差为：

$$s = (n_o - n_e)d \quad , \quad \text{相位差为 } \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot s。$$

- 若 $s = m\lambda \pm \lambda/4$ ，即 $\Delta = 2m\pi \pm \frac{\pi}{2}$ ，该波片称为 $\lambda/4$ 波片。
- 若 $s = m\lambda \pm \lambda/2$ ，即 $\Delta = 2m\pi \pm \pi$ ，该波片称为 $\lambda/2$ 波片。



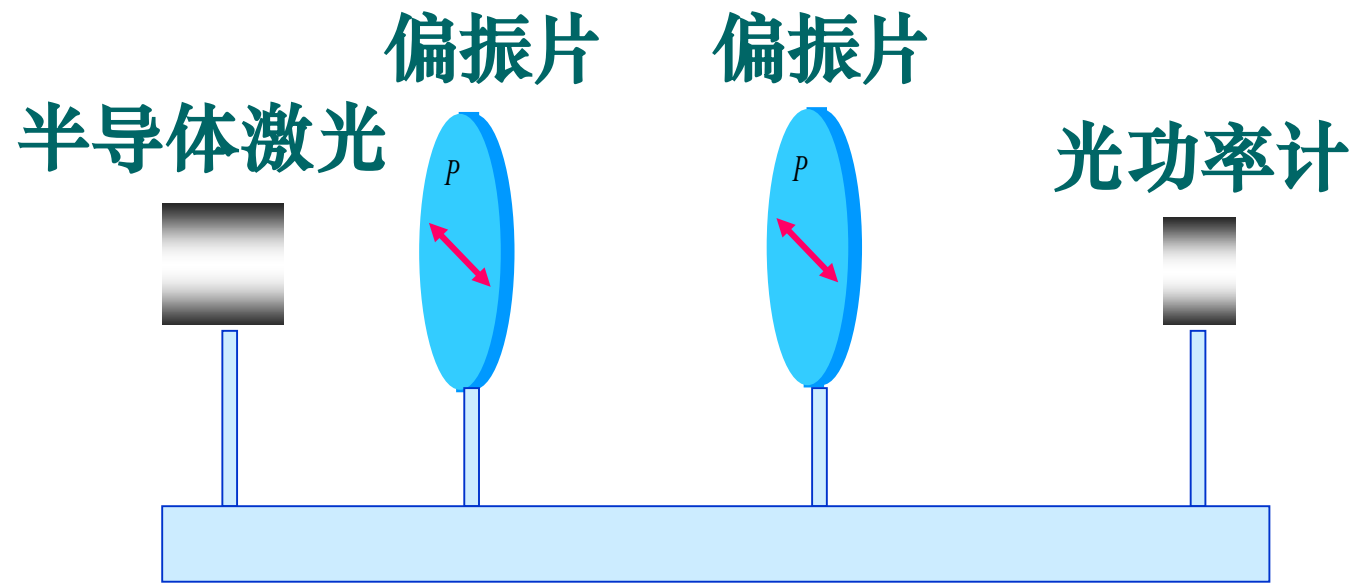
三、实验原理/ 3.5、光学元件简介

产生偏振光的常用方式：

1. 光在界面的反射和透射：根据布儒斯特定律，入射角为一特定值时，反射光为完全线偏振光，折射光为部分偏振光。
2. 光学棱镜：利用晶体的双折射原理得到的o光和e光是完全偏振光。
3. 采用偏振片作为起偏器产生偏振光。本实验中采用偏振片作为起偏器和检偏器。

四、实验内容/ 4.1 马吕斯定律的验证

测量光路



验证马吕斯定律

四、实验内容/ 4.1马吕斯定律的验证

操作提示

点击“开始实验”，可以看到右下角“实验内容”包含两部分：

“研究 $\lambda/4$ 波片对偏振光的影响”和“研究 $\lambda/2$ 波片对偏振光的影响”。

桌面有4件仪器，从左至右分别为光源、偏振片A、 $\lambda/4$ 波片、偏振片B、光屏，如图1所示。用鼠标选中仪器，按下“Delete”键可以把桌面上的仪器放回左下角的“实验仪器”里。也可用鼠标把实验仪器拖回至桌面。



图1 偏振光研究实验仪器

四、实验内容/ 4.1马吕斯定律的验证

操作提示

双击光源可以选择发出光的类型，如图2所示。

打开电源后，双击光屏，可以看到光斑，并可读取光强的值，如图3所示。

双击偏振片或波片，可以看到仪器的放大图，并可用鼠标点击上方箭头调节偏振片或波片的角度。如图4和图5所示。其中外环显示的刻度值固定不动，只有偏振片或波片可以转动。



图2 光源选择



图3 光屏

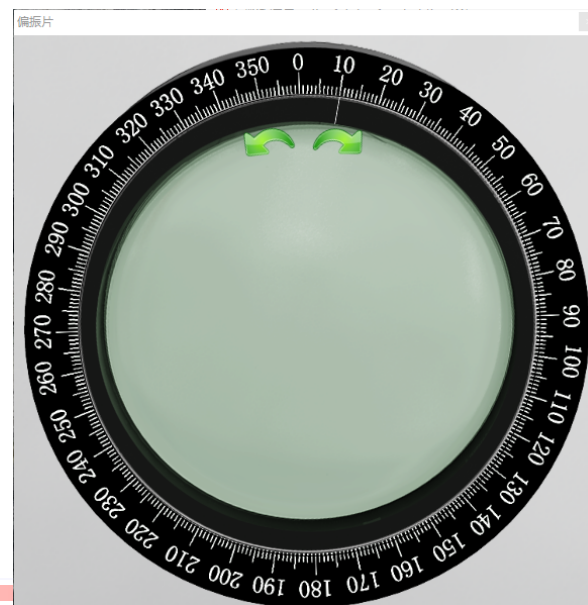


图4 偏振片角度调节

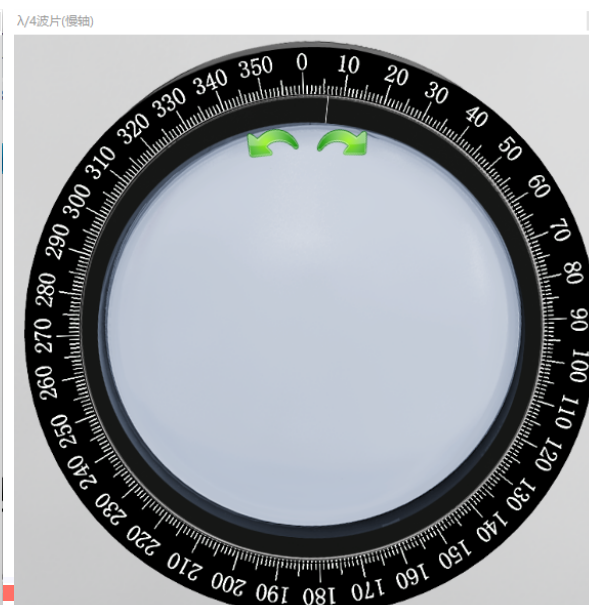


图5 波片角度调节

四、实验内容/ 4.1马吕斯定律的验证

- 步骤**
- 1. 移去实验台上的波片，保留两个偏振片，并使两偏振片的角度都设为0；
 - 2. 打开光源，选择自然光；双击屏幕，记下此时的光强的值；
 - 3. 改变偏振片B的角度 ϕ ，每间隔15度读取一次光强的值，记入表1。同时换算角度 ϕ 对应的 $\cos(\phi)$ 、 $\cos(\phi)^2$ 。

ϕ	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$\cos(\phi)$	1.00	0.97	0.87	0.71	0.50	0.26	0.00	-0.26	-0.50	-0.71	-0.87	-0.97	-1.00
$\cos(\phi)^2$	1.00	0.93	0.75	0.50	0.25	0.07	0.00	0.07	0.25	0.50	0.75	0.93	1.00
光强I	49.98	46.64	37.49	24.99	13.26	3.35	0.00	3.35	12.5	24.99	37.49	46.64	49.98
偏振片B	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	
$\cos(\phi)$	-0.97	-0.87	-0.71	-0.50	-0.26	0.00	0.26	0.50	0.71	0.87	0.97	1.00	
$\cos(\phi)^2$	0.93	0.75	0.50	0.25	0.07	0.00	0.07	0.25	0.50	0.75	0.93	1.00	
光强I	46.64	37.49	24.99	13.26	3.35	0.00	3.35	12.5	24.99	37.49	46.64	49.98	

表1 线偏光的光强随偏振片B角度的变化关系



四、实验内容/ 4.2 研究 $\lambda/4$ 波片对偏振光的影响

- 步骤** 1. 实验内容选“研究 $\lambda/4$ 波片对偏振光的影响”，试验台上从左至右依次为光源、偏振片、 $\lambda/4$ 波片、偏振片和光屏。使偏振片和波片的角度都调节至0；
2. 打开光源，选择自然光；
3. 使 $\lambda/4$ 波片的角度 $\theta_{1/4}$ 分别设为0、15和30度，测量光强随偏振片B的角度，记入表2。

偏振片B	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$\theta_{1/4} = 0$	49.98	46.64	37.49	24.99	13.26	3.35	0.00	3.35	12.50	24.99	37.49	46.64	49.98
$\theta_{1/4} = 15$	43.74	46.64	43.47	35.81	24.99	14.17	6.25	3.35	6.25	14.17	24.99	35.81	43.74
$\theta_{1/4} = 30$	31.24	35.81	37.49	35.81	31.24	24.99	18.74	14.17	12.50	14.17	18.74	24.99	31.24
偏振片B	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	
$\theta_{1/4} = 0$	46.64	37.49	24.99	13.26	3.35	0.00	3.35	12.50	24.99	37.49	46.64	49.98	
$\theta_{1/4} = 15$	46.64	43.74	35.81	24.99	14.17	6.25	3.35	6.25	14.17	24.99	35.81	43.74	
$\theta_{1/4} = 30$	35.81	37.49	35.81	31.24	24.99	18.74	14.17	12.5	14.17	18.74	24.99	31.24	

表2 线偏振光经 $\lambda/4$ 波片后随偏振片B角度的变化关系



四、实验内容/ 4.3 研究 $\lambda/2$ 波片对偏振光的影响

步骤：实验内容选“研究 $\lambda/2$ 波片对偏振光的影响”，重复“研究 $\lambda/4$ 波片对偏振光的影响”的步骤，记入表3。

偏振片B	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
$\theta_{1/2} = 0$	49.98	46.64	37.49	24.99	13.26	3.35	0.00	3.35	12.50	24.99	37.49	46.64	49.98
$\theta_{1/2} = 15$	37.49	46.64	49.98	46.64	37.49	24.99	12.50	3.35	0.00	3.35	12.50	24.99	37.49
$\theta_{1/2} = 30$	12.50	24.99	37.49	46.64	49.98	46.64	37.49	24.99	12.50	3.35	0.00	3.35	12.5
偏振片B	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	
$\theta_{1/2} = 0$	46.64	37.49	24.99	13.26	3.35	0.00	3.35	12.50	24.99	37.49	46.64	49.98	
$\theta_{1/2} = 15$	46.64	49.98	46.64	37.49	24.99	13.26	3.35	0.00	3.35	12.50	24.99	37.49	
$\theta_{1/2} = 30$	24.99	37.49	46.64	49.98	46.64	37.49	24.99	12.50	3.35	0.00	3.35	12.50	

表3 线偏振光经 $\lambda/2$ 波片后随偏振片B角度的变化关系

五、实验内容/ 5.1 数据处理

1、把表1的数据分别以 ϕ 、 $\cos(\phi)$ 和 $\cos(\phi)^2$ 为横轴，光强为纵轴画图。得到图6、图7和图8。由图7和图8可知，以 $\cos(\phi)$ 和 $\cos(\phi)^2$ 为横轴，分别显示近似的抛物线和直线关系。因此，进一步验证了线偏振光经过检偏器后的光强遵循的关系 $I = I_0 \cos(\phi)^2$ ，即验证了马吕斯定律。

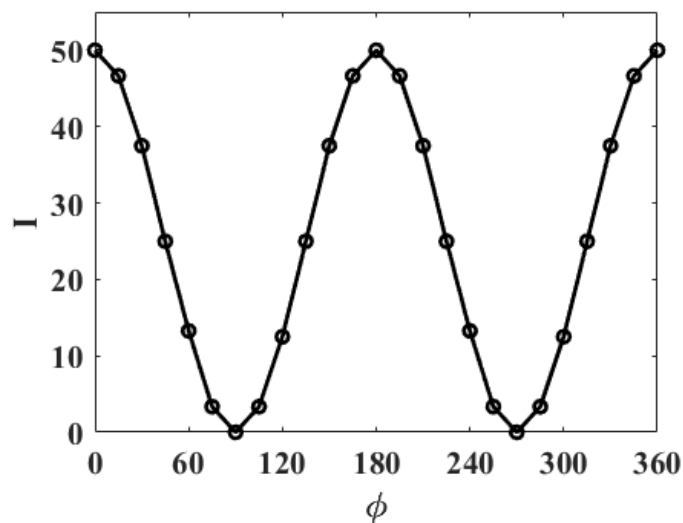


图6 光强 I 与 ϕ 的关系

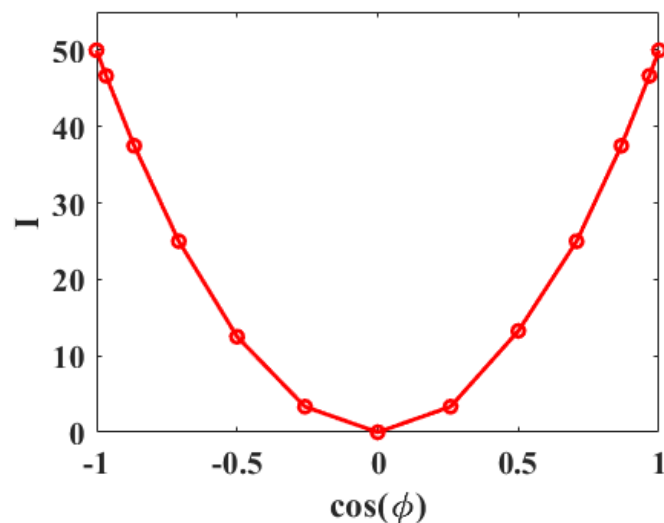


图7 光强 I 与 $\cos(\phi)$ 的关系

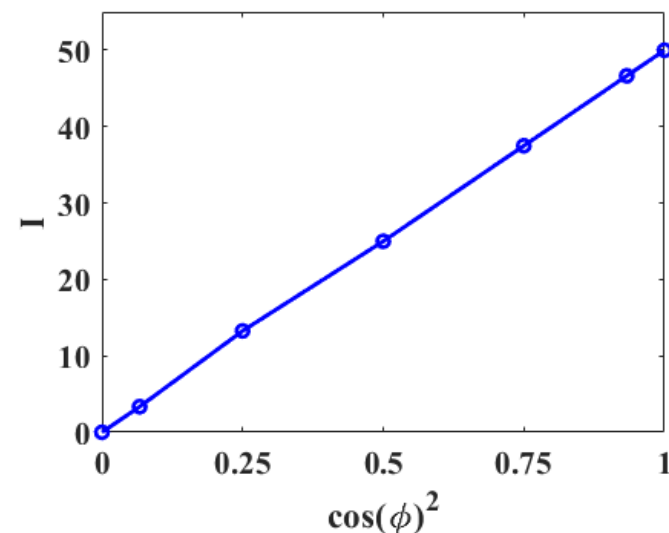


图8 光强 I 与 $\cos(\phi)^2$ 的关系

五、实验内容/5.1 数据处理

2、以偏振片B的角度为横坐标，把表2和表3得到的光强数据画图得到图9和图10。

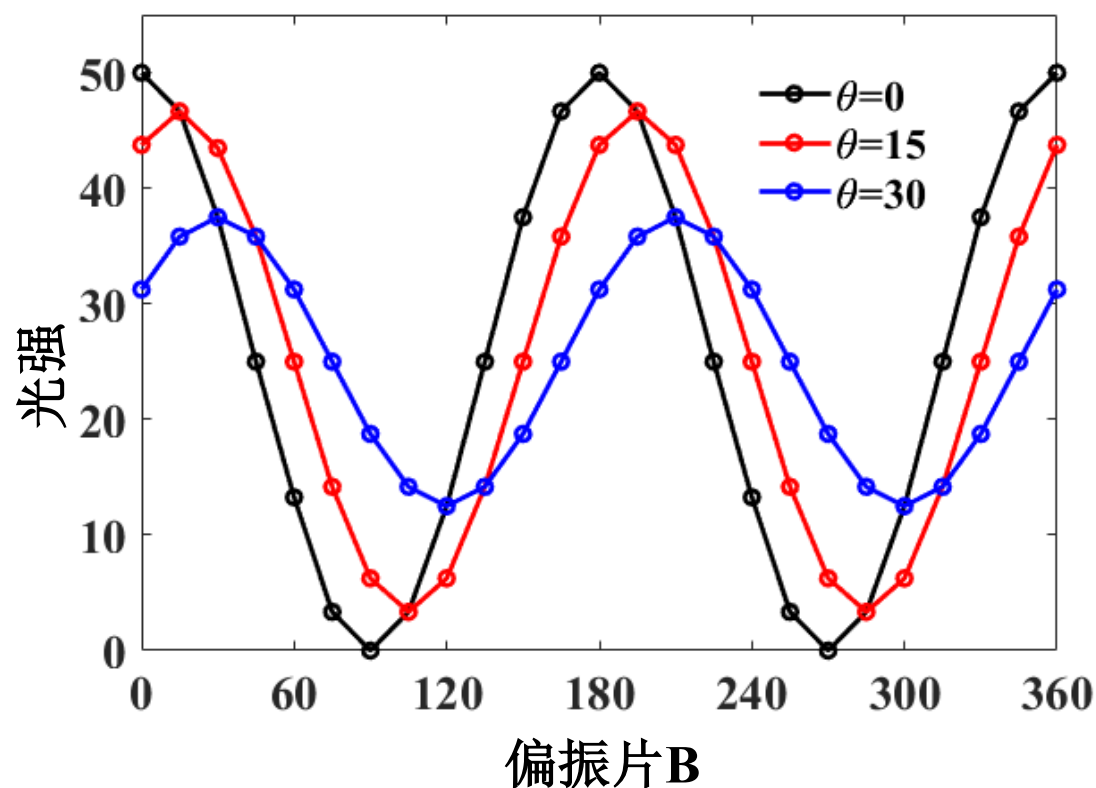


图9 线偏振光经 $\lambda/4$ 波片后的影响

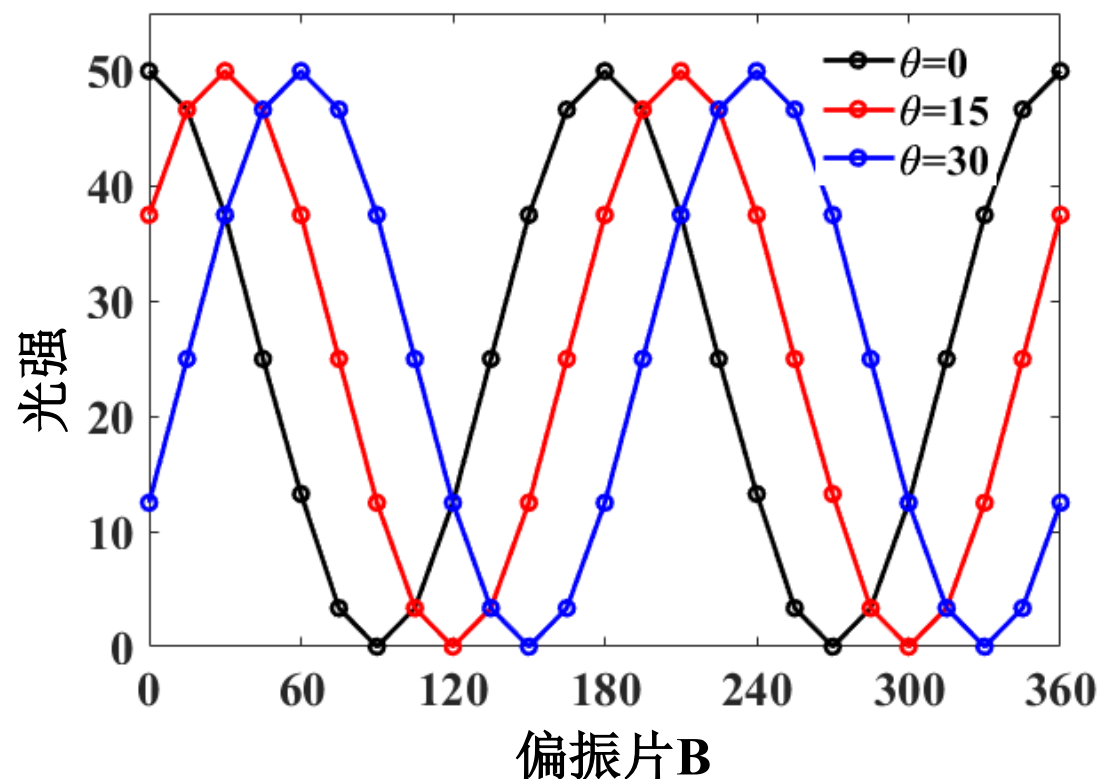


图10 线偏振光经 $\lambda/2$ 波片后的影响

五、实验内容/5.1 数据处理

由图9可知，线偏振光经过 $\lambda/4$ 波片后的情况与波片的角度有关。如果波片的角度为0，则通过 $\lambda/4$ 波片的光为线偏振光；如果 $\lambda/4$ 波片的角度不为0，经过波片后的光不再是线偏振光，因为经检偏器旋转一周过程中的光强最小值不为0。

由图10可知，线偏振光经过 $\lambda/2$ 波片后还是线偏振光。当 $\lambda/2$ 波片转动 θ 角时，线偏振光的偏振方向转动 2θ 。

线偏振光经过波片后的变化可由入射光与波片快轴（或慢轴）的夹角进行说明。

五、实验内容/5.2 结果说明

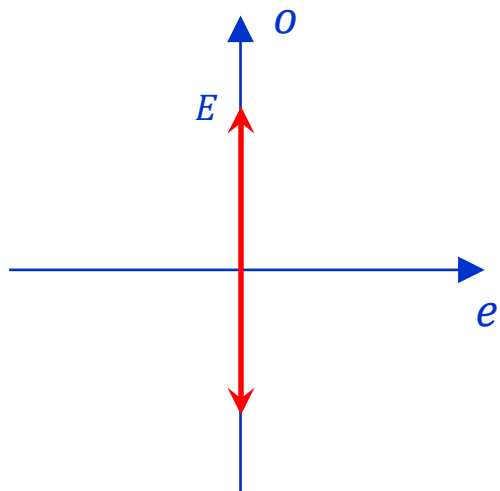


图11 波片的o轴与偏振方向平行

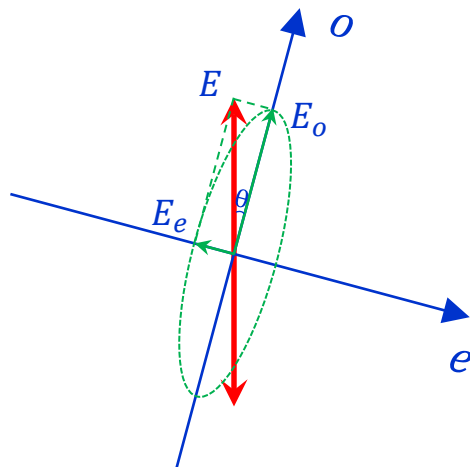


图12 $\lambda/4$ 波片旋转 θ 角

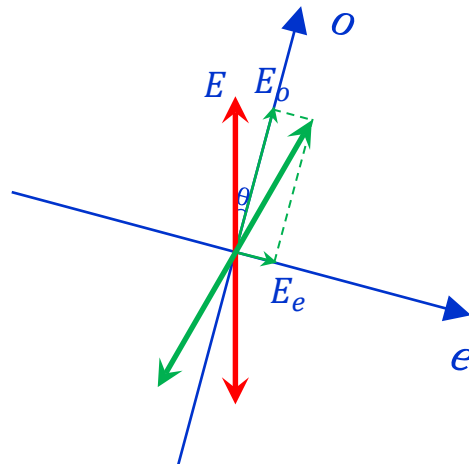



图13 $\lambda/2$ 波片旋转 θ 角

上图坐标轴表示波片的o轴和e轴，红色箭头表示入射线偏振光的振动方向，实验中起偏器的设置不变。图12和图13中的绿色箭头表示偏振光经过波片后的偏振状态。当波片的快轴平行于偏振方向时（如图10所示），由于偏振方向在e轴的投影为零，光没有分量被延迟，因此经过检偏器后的光强分布保持不变，此情况与不放波片结果一样。波片旋转 θ 角后，入射光的光矢量方向在o轴和e轴的投影的大小分别为 $E_o = E \cos(\theta)$ ， $E_e = E \sin(\theta)$ 。

五、实验内容/ 5.2 结果说明

- 如果波片是 $\lambda/4$ 波片（如图12所示）。 E_o 和 E_e 的相位差等于 $\frac{\pi}{2}$ ，则经波片光矢量端点描出的是一个椭圆，透过波片后为椭圆偏振光。当 $\theta < \frac{\pi}{4}$ 时，椭圆的长轴和短轴分别为 E_o 和 E_e 。当 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 时， $E_o = E_e$ ，此时为圆偏振光。
- 如果波片是 $\lambda/2$ 波片（如图13所示）。 E_o 和 E_e 的相位差等于 π ，光矢量端点方向始终在一条直线上，透过波片后仍然是线偏振光。由于相位差 π 的存在（相当于 E_o 的方向不变， E_e 的方向反向），偏振方向相当于原偏振方向旋转 2θ 角。



2022.4.2

深圳大学大学物理教学实验中心

再见!

