

课程编号 2701000009

得分	教师签名	批改日期

深 圳 大 学 实 验 报 告

课程名称: 物理光学实验

实验名称: 实验 6-马吕斯定律的验证和偏振光变换实验

学 院: 物理与光电工程学院

指导教师: 叶帅

报 告 人: 秦阳 组 号:

学 号: 2021270104 实验地点: 致原楼 101

实验时间: 2023 年 5 月 25 日

提交时间: 2023 年 6 月 1 日

一、实验目的

1. 产生线偏振光、椭圆偏振光及圆偏振光.
2. 掌握检验线偏振光、椭圆偏振光及圆偏振光的方法.
3. 理解马吕斯定律.
4. 通过实验学会验证马吕斯定律.

二、实验原理

1. 自然光与偏振光

从普通光源发出的光不具有偏振性. 因为光源中发光原子和分子形成的电偶极子的振动不可能有一个特定的方向. 相反地, 它们的振动方向杂乱无章, 完全随机. 因此各个方向都有可能, 并且各个振动方向上没有一个方向比其他方向更占优势. 我们把这种没有偏振性的光成为自然光. 自然光在传播过程中, 如果受到某种作用造成各个振动方向上的强度不等, 使某一方向的振动比其他更占优势时, 那么这种光叫做部分偏振光. 当光波只包含单个振动方向时, 该光波为线偏振光.

光大体上有五种偏振状态, 即线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光、自然光和部分偏振光. 其中线偏振光和圆偏振光由可看作椭圆偏振光的特例.

2. 线偏振光的获得

1) 反射起偏及透射起偏

一束单色自然光从不同角度入射到介质表面, 其反射光和折射光一般是部分偏振光. 当以特定角度即布儒斯特 (*Brewster*) 角 θ_B 入射时, 不管入射光的偏振状态如何, 反射光将成为线偏振光, 其电矢量垂直于入射面. 一般情况下, 同一块玻璃片在布儒斯特角下对光的反射产生的线偏振光强度太小, 难以利用. 从玻璃片投射的光强度虽大, 但不是线偏振的, 是部分偏振光, 并且偏振度很小. 为解决这一矛盾, 可以让自然光以布儒斯特角入射并通过一叠表面平行的玻璃片堆. 由于自然光可以被等效为两个振动方向互相垂直、振幅相等且没有固定位相关系的线偏光, 又因为光通过玻璃片堆中的每一个界面, 都要反射掉一些振动垂直于入射面的线偏光, 经多次反射, 最后从玻璃片堆透射出来的光一般是部分偏振光, 如果玻璃片数目较大, 则透过玻璃片堆的折射光就成为振动平行于入射面的线偏光, 并且折射线偏振光的强度也比较大, 这就是透射起偏法. 所有这些结论都可以从菲涅耳公式得到论证.

2) 二向色性起偏

二向色性是指某些各向异性晶体对不同方向的光振动具有不同吸收本领的性质. 即当自然光通过它时, 只能有某一确定振动方向 (称为透振方向) 的光能够通过, 而振动方向与此透振方向垂直的光却被吸收掉. 现在广泛使用的人造偏振片, 就是利用二向色性获得线偏振光的. 优点是可获得光束截面很大的线偏振光, 缺点是光能损失较多, 且对波长有选择性.

3) 波晶片

一束光在晶体内传播时被分成两束折射程度不同的光束，这种现象叫做光的双折射现象，能产生双折射的晶体常叫做双折射晶体。实验发现，晶体内一束折射光线符合折射定律，叫做寻常光（*o*光），而另一束折射光线不符合折射定律，所以叫做非寻常光（*e*光）。当光沿着某个特殊的方向传播时，不会分成*o*光和*e*光，我们称这个方向为晶体的光轴。它表示晶体的一个特定方向。只有一个光轴的晶体叫做单轴晶体，例如冰、石英、红宝石和方解石等。同理，双轴晶体具有两个光轴方向。

利用单轴晶体的双折射，所产生的寻常光（*o*光）和非寻常光（*e*光）都是线偏振光。前者的电矢量 **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。

4) 散射

当以自然光入射时，散射光有一定程度的偏振，偏振程度与 θ 角有关。在与入射方向垂直的方向上，散射光是完全偏振的；在与入射方向平行的方向上，散射光仍为自然光；在其他方向上，散射光为部分偏振光。

3. 偏振光的检验

1) 线偏振光

用在偏振片平面内旋转一圈的偏振片（即检偏镜）迎着光进行检验，则由马吕斯定律可知，将出现两个明亮方位和两个暗方位，且暗光强应是零（简称两明两零）。

2) 圆偏振光

用旋转的检偏镜检查时，光强将无变化。

3) 椭圆偏振光

用旋转的检偏镜检查时，一周之内，光强将出现两次明亮和两次较暗，但不会为零。（简称为两明两暗）

以上的验证方法只适合于已知待测光是某一种偏振光而不包含自然光的情况。如果待测光有可能包含自然光，检验方法如下表。

表 1 偏振光的检验

把检偏器对着被检光旋转一周，若得到						
两明两零	光强不变			两明两暗		
无需 插入波片	在光路中插入 $\lambda/4$ 波片，再旋转检偏器，若得			在光路中插入 $\lambda/4$ 波片，并使光轴与检得的暗方位相重合，再旋转检偏器，若		
	两明两零 则为	光强不变 则为	两明两暗 则为	两明两零 则为	两明两暗 但暗方位 与为插入 $\lambda/4$ 波片时 相同则为	两明两暗 但暗程度 与前不同 则为
线偏振光	圆偏振光	自然光	自然光+ 圆偏振光	椭圆 偏振光	自然光+ 线偏振光	自然光+椭 圆偏振光

4. 马吕斯定律

根据电磁场理论，一束强度为 I_0 的线偏振光，其电矢量为 E_0 。通过检偏片（右侧偏振片）后，电矢量在检偏片透振方向的投影为

$$E = E_0 \cos \alpha \quad (1)$$

光束通过检偏片后，只剩余透振方向的电矢量成分，由于

$$I \propto \langle E^2 \rangle \quad (2)$$

因此输出光强为

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (3)$$

其中

α 为线偏振光的偏振方向与检偏片的透振方向之间的夹角

$\langle \rangle$ 表示求时间平均。

如图所示。

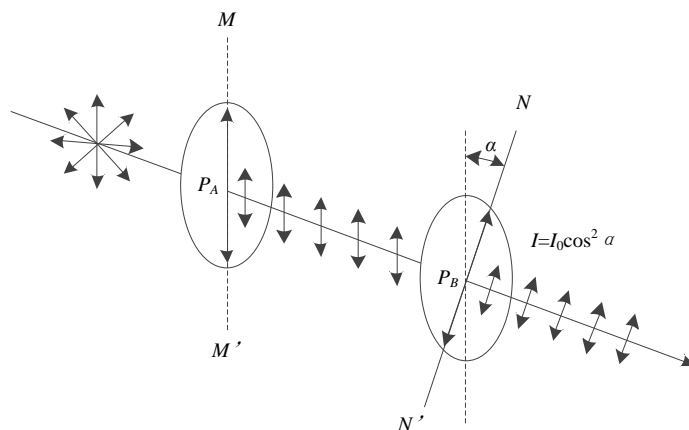


图 1 马吕斯定律原理图

这就是我们熟知的马吕斯定律。由上式(3)可知，当两偏振器透光轴平行($\alpha = 0^\circ$)时，投射光强最大，为 I_0 ；当两偏振器透光轴相互垂直($\alpha = 90^\circ$)时，如果偏振器是理想的，则投射光强为零，没有光从检偏片出射，称此时检偏片处于消光位置，同时说明从起偏片（左侧偏振片）出射的光是完全线偏振光；当两偏振器相对转动时，随着 α 的变化，可以连续改变透射光。

上述描述也提供了一个检验一束未知光束是否为线偏振光的方法。即让未知状态通过光束偏振片（称为检偏片）。旋转检偏片360度，如果透射光出现极大、消光、极大、消光的状态变化，且极大与消光状态之间检偏片的夹角为90度，则可知未知状态光束为线偏振光。如果未知状态光束透过检偏片后，不能出现消光状态（即透射光强为零），则该光束不是线偏振光，可能是部分偏振光或者椭圆偏振光。

5. 波片

当一束单色自然光在各向同性介质的分界面折射时，按照折射定律光只有一束，这是我们所熟知的。但是，当一束单色自然光在各向异性晶体的分界面折射时，一般产生两束折射光，它们都是线偏振光。这种现象称为双折射。其中遵守折射定律的光称为寻常光，或o光。另外一束不遵守折射定律的光称为非寻常光，或e光。

晶体内存在一个特殊的方向，当光在晶体内沿着这个方向传播时不发生双折射。晶体内的这个特殊方向称为晶体光轴。晶体中光轴和晶体表面法线构成的平面称为主截面。当光束以主截面为入射面入射到晶体时，*o*光和*e*光都在主截面内，并且电矢量方向互相垂直。

波片是从单轴晶体切出的平行平面薄片，其光轴与表面平行。如果线偏振光的电矢量不是平行于或者垂直于光轴方向，它将在波片内分解为*o*光和*e*光，两束光的传播方向相同，而电矢量互相垂直。在负晶体中，把*e*光电矢量方向称为快轴，*o*光电矢量方向称为慢轴。由于*o*光和*e*光在波片中速度不同，它们通过波片后将产生一定的位相差。设波片厚度为*d*，则*o*光和*e*光通过波片的光程差分别为*n_od*和*n_ed*，两者的光程差为：

$$\Delta = (n_e - n_o) \cdot d \quad (4)$$

而位相差为：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) \cdot d \quad (5)$$

由上式可见，适当的选择波片的厚度*d*，可以使*o*光和*e*光有任意数值的光程差和位相差。光程差为

$$\Delta = (n_e - n_o) \cdot d = \left(m + \frac{1}{4}\right) \lambda \quad (6)$$

的波片（*m*为零或者正整数）称为λ/4波片。其次还有λ/2波片和全波片，它们的*o*光和*e*光的光程差分别为Δ = (m + (1/2))λ和Δ = mλ。

当两个λ/4波片的快轴重合时，对*o*光和*e*光引入的光程差为Δ = (m + (1/2))λ，此时两个λ/4波片可看作一个λ/2波片。若两个λ/4波片的快轴互相垂直时，叠加结果相当于一块各向同性的介质。光在其内的偏振态不发生任何变化。

6. 偏振光传播方程

当一束线偏振光正入射到波片时，若线偏振光的电矢量方向与波片光轴成θ角，θ ≠ 0°或θ ≠ 90°，那么入射光将在波片内分解为振动方向互相垂直的*o*光和*e*光。两束光出射后具有恒定的位相差δ，并且传播速度相等。假设两个线偏振光的振动分别沿*x*轴和*y*轴，那么在传播路程上某一点的振动方程可以表示为

$$E_x = A_x \cos(\omega t - kz) \quad (7)$$

$$E_y = A_y \cos(\omega t - kz + \delta) \quad (8)$$

式中

*A*表示振幅

ω为二光波的角频率

*t*表示时间

*k*为波矢的数值

δ是两波的相对相位差。

两个电矢量合成，如下图所示。

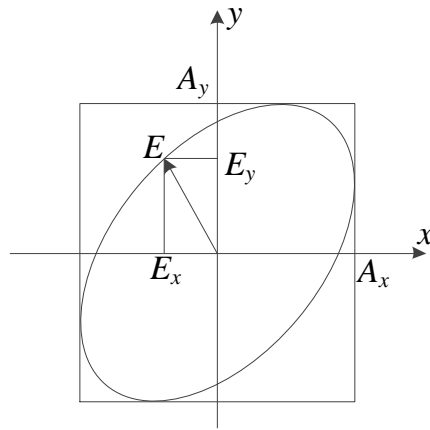


图 2 光矢量合成

合振动的大小和方向随时间变化。因此，当晶体引入的位像差不一样时，会有不同的轨迹。

(1) 当 $\delta = 0$ 或者 $\pm 2\pi$ 的整数倍时，振动方程可化简为：

$$E_y = \frac{A_y}{A_x} E_x \quad (9)$$

这是直线方程，表示合矢量端点的运动沿一条直线进行，即线偏振光。

(2) 当 $\delta = \pm \pi/2$ 及其奇数倍，振动方程可化简为：

$$\frac{E_x^2}{A_x^2} + \frac{E_y^2}{A_y^2} = 1 \quad (10)$$

这是一个标准椭圆方程。按照合矢量旋转方向的不同，可以将椭圆偏振光分为右旋和左旋两类。通常规定当对着光传播的方向看去，合矢量是顺时针方向时，偏振光是右旋的，反之则为左旋。

除了标准的椭圆之外，也存在其他形式的椭圆方程，取决于位像差 δ 的取值。如图 3 所示。

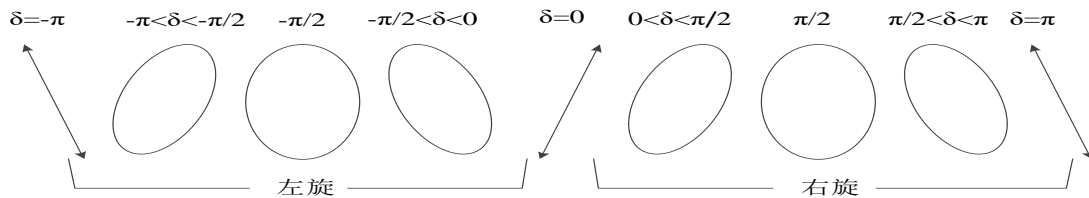


图 3 椭圆偏振光随相位的变化过程

若 $A_x = A_y$ ，由式(10)可看出运动轨迹是一个圆，表示此时合成的光波是圆偏振光。

若入射线偏振光与波片的光轴平行或垂直时，出射的仍为线偏振光，且振动方向不改变。

7. 椭圆偏振光左旋右旋的判断

当一束正椭圆偏光射向 $\lambda/4$ 波片，并尽量使得波片的快轴方向与偏振椭圆的长轴方向一致，它的出射光将会变为线偏光。用检偏器结合相机功率测量功能检测。测出线偏光偏振方向后，将之平移到波片的快、慢轴坐标系内，考察二者的相对关系。若处于1、3象限，则为右旋偏振光；反之则为左旋偏振。如图4所示。

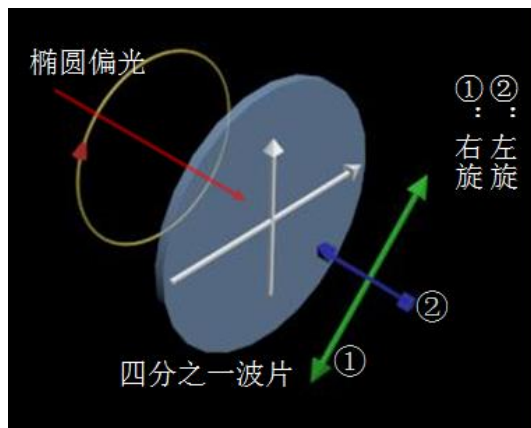


图4 椭圆左旋右旋的判断

由图4可知，当 $\delta = -\pi/2$ 时，线偏振光变为左旋的椭圆偏振光。此时振动方程为：

$$E_x = A_x \cos(\omega t - kz) \quad (11)$$

$$E_y = A_y \cos\left(\omega t - kz - \frac{\pi}{2}\right) \quad (12)$$

此椭圆偏振光通过 $\lambda/4$ 波片后，再次引入 $\delta = \pi/2$ 的位相差，则振动方程变为：

$$E_x = A_x \cos(\omega t - kz) \quad (13)$$

$$E_y = A_y \cos(\omega t - kz - \pi) \quad (14)$$

联合式(13)和式(14)得：

$$E_y = -\frac{A_y}{A_x} E_x \quad (15)$$

由式(15)可看出，线偏振光处于2、4象限，是左旋偏振光。

三、实验仪器

半波片、 $\lambda/4$ 波片、偏振片、氦氖激光器、空间滤波器（针孔 $25\mu\text{m}$ ）、消相差透镜、相机等。

四、实验内容

1. 偏振光的产生和检验实验

- 1) 根据偏振光产生与检验装配图安装所有的配件，搭建针孔滤波准直光路，如图 5 所示；



图 5 偏振光产生与检验光路图

- 2) 放入起偏片和检偏器（起偏器、检偏器紧凑放置），旋转检偏器一周，若观察到「两明两零」现象，则经起偏片出射的光为线偏振光；
- 3) 如图 6 所示，插入 $\lambda/4$ 波片，旋转检偏器一周，若观察到「两明两暗」现象，则经波片后的出射光为椭圆偏振光。若观察到「两明两零」现象，则说明线偏振光偏振方向与波片快慢轴重合，此时旋转波片 45° 即可出现「亮度基本不变」的现象即圆偏振光（旋转角等于 45° ）；



图 6 椭圆偏振光检验光路图

- 4) 取下 $\lambda/4$ 波片，旋转检偏器使输出光功率最大，此时起偏片与检偏器透光轴方向一致。再放入 $\lambda/4$ 波片，旋转 $\lambda/4$ 波片，使相机软件的相对光功率值最大，此时波片的快（慢）轴与起偏片透光方向一致。记录 $\lambda/4$ 波片架上对应的角度，然后再旋转 45° ，则从波片出射的光为圆偏振光。旋转检偏器，相机软件的相对光功率值基本不发生变化（10%的功率变化即可）；

- 5) 如图 7 所示, 在 $\lambda/4$ 波片后再插入一个 $\lambda/4$ 波片, 则圆偏振光变为线偏振光. 旋转检偏器, 观察「两明两零」现象.



图 7 圆偏振光检验光路图

2. 马吕斯定律验证实验

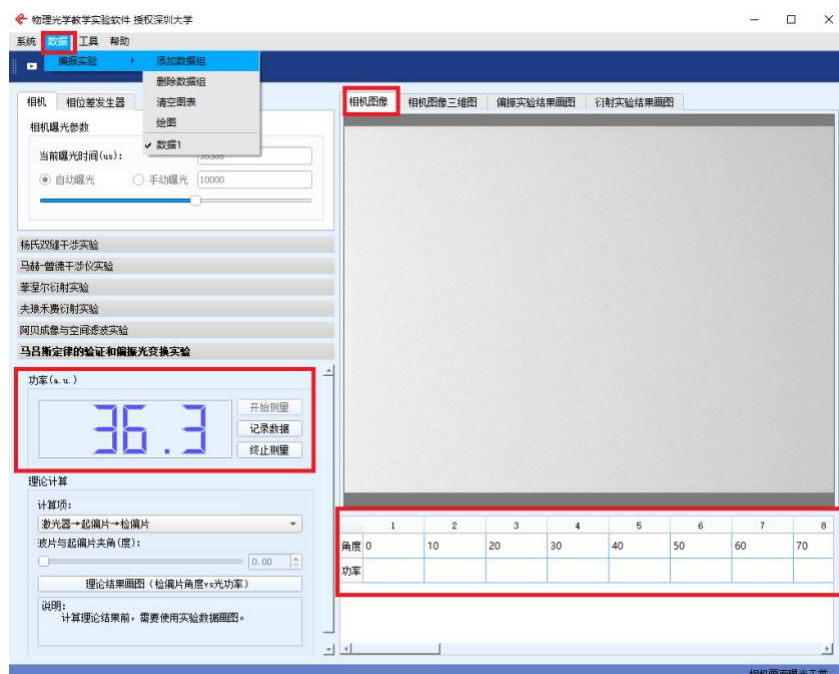
- 1) 按图 8 装配仪器配件, 搭建针孔滤波准直光路, 放置激光器和起偏片, 暂不放检偏片和 CCD. 调整激光器的水平角度与俯仰角度, 利用可变光阑调节激光器使激光束准直. 调整起偏片高度, 使起偏片与激光器同轴, 激光束能无阻挡地透过起偏片;
- 2) 调整起偏片的角度, 使得透射光束光强合适 (光强既不要太强, 也不要太弱, 软件右下角显示正常且不会太暗就可, 下同);



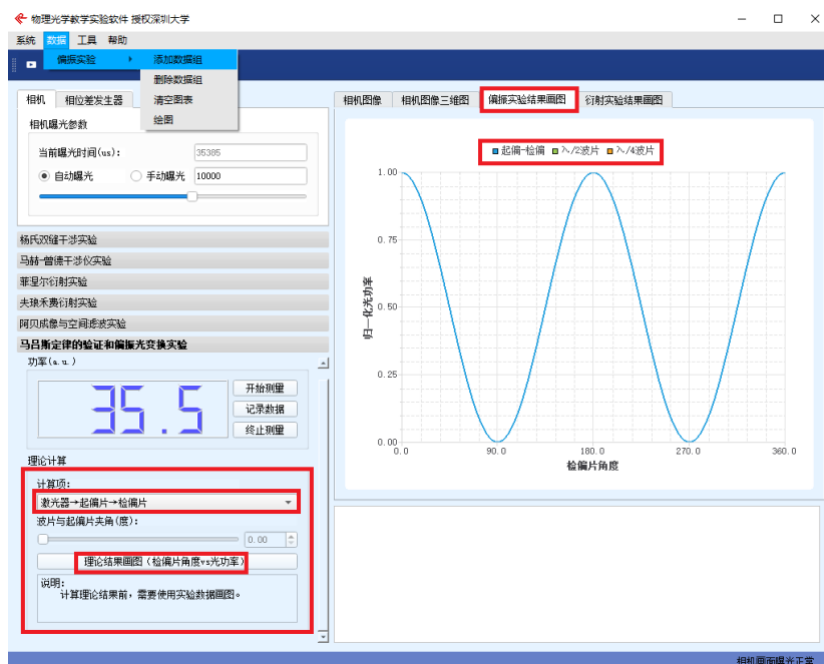
图 8 马吕斯定律的验证

- 3) 放置 CCD, 将 CCD 连接计算机. 在软件中点击「连续采集」按键, 并在「相机」页中的「相机曝光参数」选中的「自动曝光」选项. 此时在右侧「相机图像」页中, 可以预览相机捕获到的图像. 调整起偏片的角度使 CCD 上的光斑强度合适;
- 4) 放置检偏片, 调整其高度与激光束同轴. 激光束可以无阻挡透过检偏片;
- 5) 选中软件界面左侧「相对功率」页面 ($a.u.$ 为任意单位, 代表功率相对值), 点击开始测量 (数据自动连续刷新, 本实验的数据记录完后, 点击终止测量). 点击菜单栏的「数据→偏振实验→添加数据组」, 添加数据记录表格;

- 6) 调整检偏片的旋转角度，每次旋转 10° ，点击「相对功率」页的「记录数据」，记录 CCD 的光功率相对值。记录完成后点击菜单栏的「数据→偏振实验→绘图」，绘制光功率随检偏片角度变化的关系曲线，即马吕斯定律曲线。点击「偏振实验结果画图」页面观察测量结果，在左下方「偏振实验」—「理论计算」页中的「计算项」选择「激光器→起偏片→检偏片」，点击「理论结果画图」。将实验数据和理论曲线作对比，验证马吕斯定律；



- 7) 对比完成后，可右键图表选择保存数据，然后点击菜单栏的「数据→偏振实验→清空图表」清除数据，马吕斯定律检验数据测试完成后，点击终止测量。



- 6) 使两个波片旋转相同的角度 N ($N < 90^\circ$)，再通过检偏器寻找出射光的偏振方向。若出射光偏振方向不变，则两波片快轴与慢轴重合。若出射光角度改变 $2N$ ，则两波片快轴与快轴重合；
- 7) 根据图 10 进行实验，先插入一个 $\lambda/4$ 波片，使线偏振光方向与波片轴向不重合。产生一个椭圆偏振光；
- 8) 通过检偏器和相机及软件相对功率测量功能配合使用，找出椭圆偏振光的长轴方向。（光强最大时检偏器的透振方向与偏振光的长轴方向一致，反之则透振方向与偏振光的短轴方向一致。）；
- 9) 让椭圆偏振光再通过一块 $\lambda/4$ 波片，并尽量使得波片的快（慢）轴方向与偏振椭圆的长轴方向一致。此时出射一个线偏振光；
- 10) 用检偏器确定出射线偏光的振动方向，进而判断出其所处的象限，再根据象限判断旋向。（逆着光的传播方向看去若处于1、3象限，则为右旋偏振）

五、数据记录

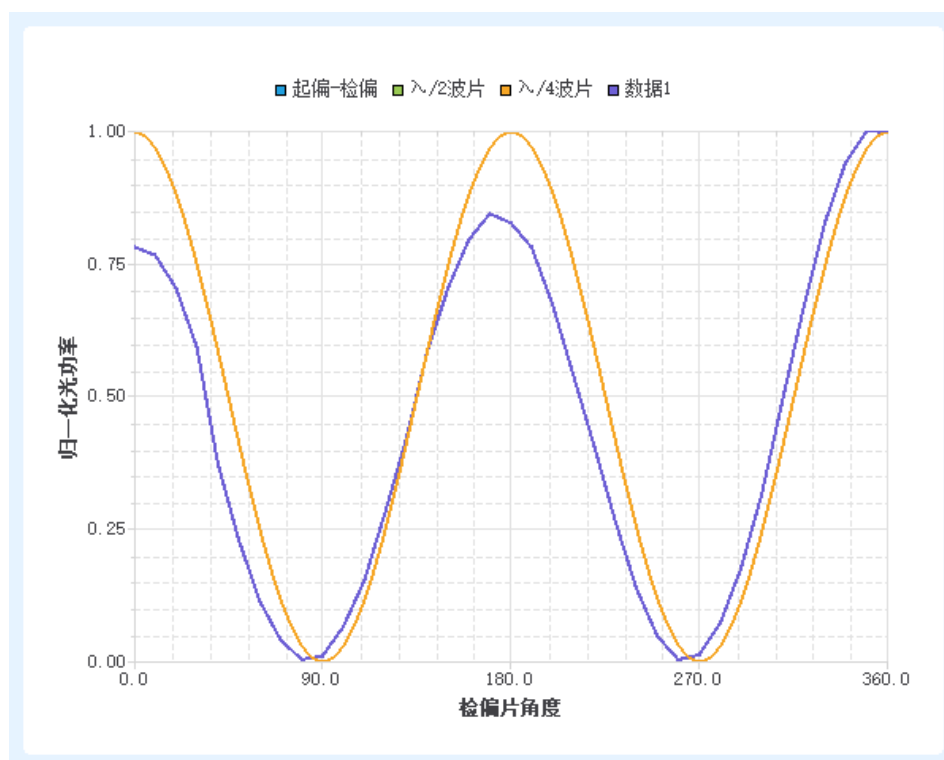


图 11 线偏振光

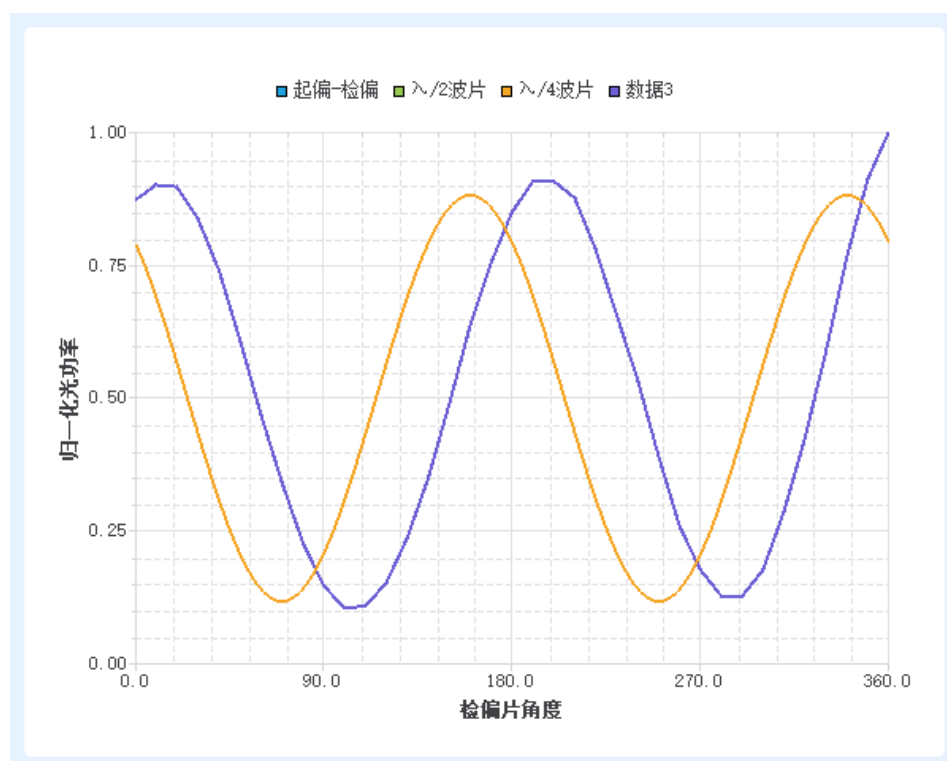


图 12 椭圆偏振光

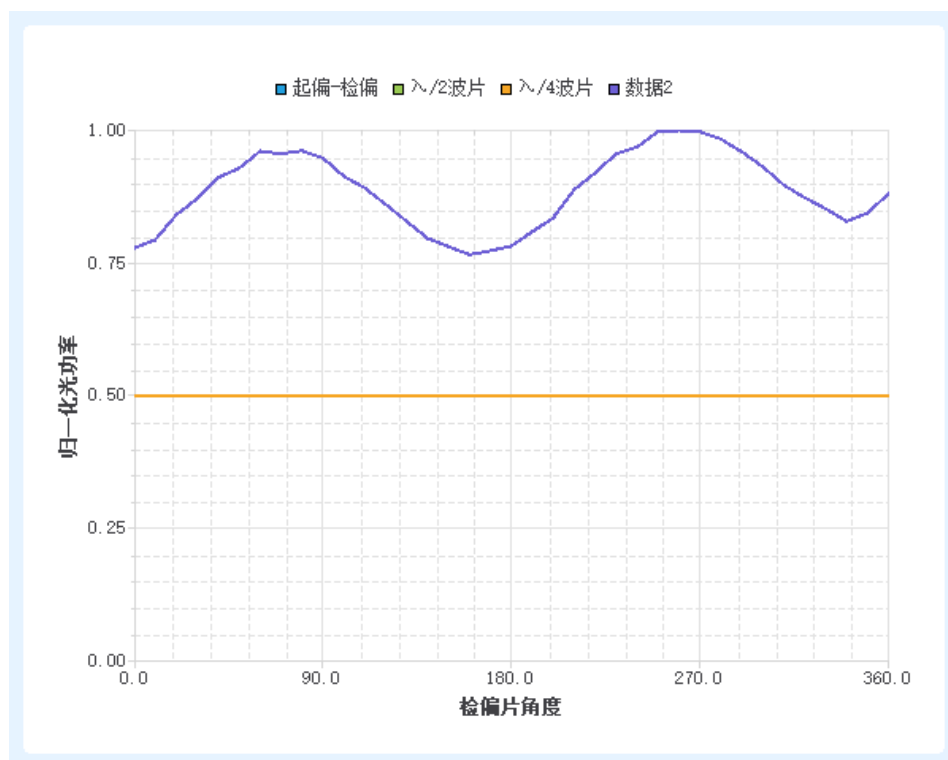


图 13 圆偏振光

六、数据处理

本次实验无需数据处理.

七、结果陈述

根据本次实验的结果, 成功验证了阿贝成像原理. 将后焦平面的狭缝替换为不同尺寸的圆孔从而实现低通滤波的效果, 替换为不同尺寸的圆屏从而实现高通滤波的效果.

八、实验总结与思考题

① 实验总结

本实验成功验证了阿贝成像原理, 并深化了我们对于傅里叶光学中空间频谱和空间滤波概念的理解. 通过实验, 我们初步探索了简单的空间滤波在光信息处理中的实际应用, 并理解了透镜孔径对成像的影响和两种简单的空间滤波方式. 同时, 我们观察了夫琅禾费衍射并与理论进行了对比. 我们还通过使用不同的滤波器和透镜, 展示了阿贝成像原理中傅里叶变换的作用, 以及空间滤波如何改变成像结果. 通过这一系列实验, 我们得以更清晰地理解空间傅里叶变换和空间滤波的原理和实际应用.

② 思考题

本次实验无思考题.

指导教师批阅意见：

评价等级	预习情况	实验过程		报告撰写			总体评价
	掌握实验目的、实验原理和要求	实验态度	动手能力和团队协作能力	按实验要求如实记录实验过程和现象	实验结果表述规范并有适当的文字说明	对实验结果进行适当的分析并回答思考题	
好							
中							
差							

成绩评定：

指导教师签字：

年 月 日

备注：

注：1、报告内的项目或内容设置，可根据实际情况加以调整和补充。

2、教师批改学生实验报告时间应在学生提交实验报告时间后 10 日内。