

偏振光现象观察与分析

Zric 物理学系

摘要：本实验使用 He-Ne 激光器与光强计，验证了马吕斯定律；定性研究了 1/4 波片转过不同角度后经过它的线偏振光光强极值位置、大小及振动状态，同时定量测量了波片转过 30° 时其一周的光强分布，在极坐标下作图，并推导给出理论公式拟合；定量测量了线偏光经过 1/2 波片后，再次达到最小光强时检偏器转过角度约为波片转过角度的两倍，并分析了最小光强不为 0 的原因；探究了两 1/4 波片合成 1/2 波片的方法，即使 1/4 波片的两光轴平行。

一、引言

1809 年，法国工程师马吕斯在实验中发现了光的偏振现象。对于光的偏振现象研究，使人们对光的传播（反射、折射、吸收和散射等）的规律有了新的认识。特别是近年来利用光的偏振性所开发出来的各种偏振光元件、偏振光仪器和偏振光技术在现代科学技术中发挥了极其重要的作用，在光调制器、光开关、光学计量、应力分析、光信息处理、光通信、激光和光电子学器件等应用中，都大量使用偏振技术。^[1]

二、实验原理

1. 偏振光的种类：按光矢量的不同振动状态，可以把光分为五种偏振态：线偏振光、自然光、部分偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光。

2. 线偏振光的产生：偏振片是利用某些有机化合物晶体的“二向色性”制成的。当自然光通过这种偏振片后，光矢量垂直于偏振片透振方向的分量几乎完全被吸收，光矢量平行于透振方向的分量几乎完全通过，因此透射光基本上为线偏振光。

3. 波晶片：波晶片通常是一块光轴平行于表面的单轴晶片。一束平面偏振光垂直入射到波晶片后，便分解为振动方向与光轴方向平行的 e 光和与光轴方向垂直的 o 光两部分。这两种光在晶体内的传播方向虽然一致，但它们在晶体内传播的速度却不相同。e 光和 o 光通过波晶片后就产生固定的相位差 δ ，即

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

式中 λ 为入射光的波长， l 为晶片的厚度， n_e 和 n_o 分别为 e 和 o 光的主折射率。对于某种单色光，能产生相位差 $\delta = (2k + 1)\frac{\pi}{2}$ 的波晶片，称为此单色光的 1/4 波片；

能产生 $\delta = (2k+1)\pi$ 的晶片，称为 $1/2$ 波片；能产生 $\delta = 2k\pi$ 的波晶片，称为全波片。

4. 平面偏振光通过各种波片后偏振态的改变：一束振动方向与光轴成 θ 角的平面偏振光垂直入射到波片上后，会产生振动方向相互垂直的 e 和 o 光，其 E 矢量大小分别为 $E_e = E \cos \theta$, $E_o = E \sin \theta$ ，通过波片后，二者产生一附加相位差。如果入射线偏振光的振动方向与波片的光轴的夹角为 0 和 $\frac{\pi}{2}$ ，则任何波片对它都不起作用，即从波片出射的光仍为原来的线偏振光。而如果 θ 不为 0 或 $\frac{\pi}{2}$ ，线偏振光通过 $1/2$ 波片后，出来的也仍为线偏振光，但它振动方向将旋转 2θ ，即出射光和入射光的电矢量对称于光轴。线偏振光通过 $1/4$ 波片后，则可能产生线偏振光、圆偏振光和长轴与光轴垂直或平行的椭圆偏振光，这取决于入射线偏振光振动方向与光轴夹角 θ 。

三、 实验装置及过程

1. 实验装置：

波长为 635nm 的半导体激光器、两个固定在转盘上直径为 2cm 的偏振片、两个固定在转盘上直径为 2cm 的 $1/4$ 波片、一个固定在转盘上的 $1/2$ 波片、带光电接收器的数字式光功率计、光具座遮光罩、手电筒。

2. 实验过程：

(1) 验证马吕斯定律：将两块偏振片放在光路上，转动检偏器找到消光位置，此时前后偏振片透振方向垂直。转动检偏器，记录改变角度与对应光强计读数，并拟合所得数据。

(2) 研究 $1/4$ 波片的作用：调节两偏振片达到消光位置（相互垂直）后，在光路上加入 $1/4$ 波片，旋转波片直到再次消光，此时波片的光轴与偏振方向平行或垂直。调节波片分别转过 $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ ，旋转检偏器，记录两次光功率最大与最小处的角度与功率值，由此判断光的偏振状态。选取波片转过 $\alpha = 30^\circ$ 的情况进行定量测量，转动检偏器测量 360° 的光强分布（每隔 10° 记录一次），并对测量结果在极坐标下作图。

(3) 研究 $1/2$ 波片的作用：调节两偏振片达到消光位置后，在光路上加入 $1/2$ 波片，旋转波片直到再次消光。将波片在此基础上分别转过 $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ ，记录达到最小功率时检偏器转过的角度 θ 和最小功率的读数，对 α 与 θ 进行线性拟合。

(4) 用两个 $1/4$ 波片合成 $1/2$ 波片：理论上，两 $1/4$ 波片光轴平行放置即可得到 $1/2$

波片。调节两偏振片达到消光位置后，将两个 1/4 波片放入光路再次分别调节到消光状态。此时增大起偏器角度，调节检偏器至消光，若检偏器角度也增大，则两波片垂直，需将一个波片转 90° 后重复上述步骤；若检偏器角度减小，且转角等于起偏器转角，则可证明组成了 1/2 波片。 [2]

四、 实验结果和分析

4.1 马吕斯定律验证

检偏器处于消光位置时，其透振方向与线偏振光振动方向呈 90° 角。若将检偏器转动 α 角度，根据马吕斯定律 $I = I_0 \cos^2 \theta$ （其中 I 表示透射光强， θ 表示透振方向与线偏振光振动方向夹角， $\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha$ ） [2]，此处将有关系 $I = I_0 \sin^2 \alpha$ ，线性拟合 I 和 $\sin^2 \alpha$ 进行验证：

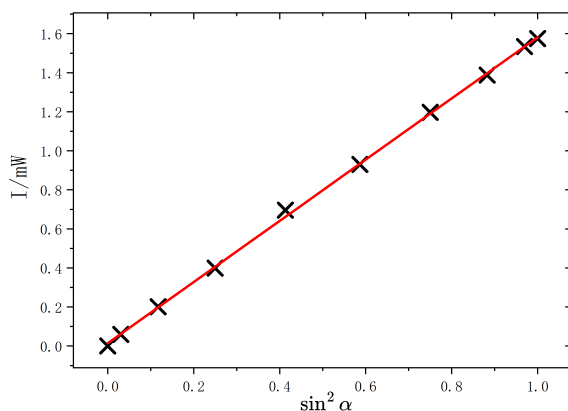


图 1 透射光强 $I - \sin^2 \alpha$ 关系

拟合得到 $R^2 = 0.9997$ ，斜率 $k = 1.57 \pm 0.01$ ，截距 $b = 0.014 \text{mW}$ ，在误差范围内可以认为 $I = I_0 \sin^2 \alpha$ 成立，因此验证了马吕斯定律成立。

4.2 1/4 波片测量

对于正入射到 1/4 波片上的线偏振光，出射光将分解为平行于光轴的 e 光和垂直于光轴的 o 光，两者的相位差为 $\frac{\pi}{2} + 2k\pi$ ，两种光再分别投影到检偏器的偏振方向上，最终在接收器处形成相干叠加，叠加光强的计算如下 (I_1 表示入射线偏振光强): [2]

$$I = I_1(\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + 2 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta \cos \delta) \quad (1)$$

$$= I_1[\cos^2 \alpha \sin^2(\alpha + \phi) + \sin^2 \alpha \cos^2(\alpha + \phi)] \quad (2)$$

如图 2 所示，公式 (1) 中 P_1, P_2 表示偏振片透振方向， α, β 表示 P_1, P_2 与光轴方向的夹角， δ 表示 A_{o2}, A_{e2} 的相位差，在本实验情况下，用公式 (1) 表示光强，其中 $\alpha = 30^\circ$ 表示起偏器与光轴夹角， $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \phi$ ， ϕ 表示初始与起偏器正交的检偏器的旋转角度，相位差 $\delta = \frac{3\pi}{2} + 2k\pi$ ，即得到公式 (2)，实验测量检偏器旋转角度 $\theta = \phi + \phi_0$ ， ϕ_0 为初始位置相对正交位置偏移量，计算得到理论光强分布：

$$I = I_1 \left[\frac{3}{4} \sin^2 \left(\frac{\pi}{3} + \theta - \phi_0 \right) + \frac{1}{4} \cos^2 \left(\frac{\pi}{3} + \theta - \phi_0 \right) \right]$$

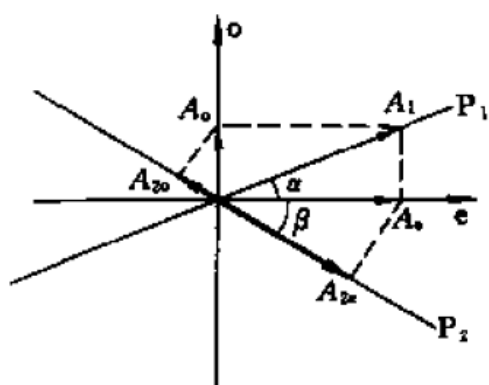


图 2 干涉光强求解示意^[2]

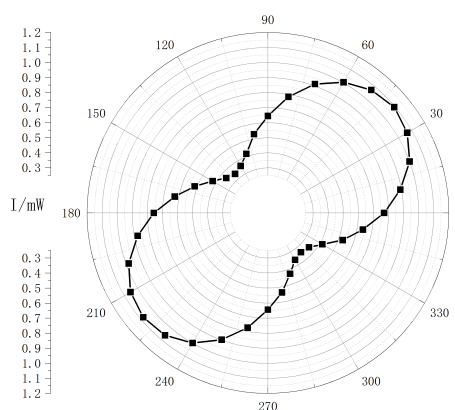


图 3 $\alpha = 30^\circ$, 光强 I -检偏器旋转角度 θ 关系

使用理论公式拟合得到 $R^2 = 0.9995$ ， $\phi_0 = 11.4^\circ$ ， $I_1 = 1.46mW$ ，在 $\alpha = 30^\circ$ 条件下验证了上述 1/4 波片的作用。

表 1 1/4 波片转动不同角度后入射的线偏振光光强极值位置、大小及偏振情况

夹角 $\alpha/^\circ$	$\theta_{m1}/^\circ$	I/mW	$\theta_{m2}/^\circ$	I/mW	$\theta_{M1}/^\circ$	I/mW	$\theta_{M2}/^\circ$	I/mW	偏振类型
15	114	0.083	294	0.085	204	1.357	26	1.369	椭圆偏振
30	310	0.341	130	0.338	39	1.095	220	1.08	椭圆偏振
45	154	0.675	344	0.678	254	0.761	66	0.767	圆偏振
60	70	0.398	248	0.395	158	1.032	334	1.036	椭圆偏振
75	264	0.118	84	0.117	349	1.297	174	1.298	椭圆偏振
90	294	0.086	114	0.087	27	1.375	207	1.357	线偏振

分析：对于波片偏转不同角度，观察数据可知，光强的极大值与极小值对应的角度之间均相差约 90° 。偏转 45° 前，极大极小光强差值随扭转角度增大而减小；在 45° 左右，两者接近相同，近似为圆偏振光；偏转 45° 后，极大极小光强差值随偏转角度增大而增大， 90° 时近似恢复线偏振光，与理论基本符合。

45° 时不是严格圆偏振光，可能是因为：光学原件没有和光轴完全垂直；功率计测量的是一段时间内的平均能流密度，因此可以看到功率计示数的频繁跳动，这导致了读数的误差； $1/4$ 波片是针对某一波长的波片，入射光波长与 $1/4$ 波片可能没有匹配。

4.3 $1/2$ 波片测量

$1/2$ 波片通过自身的各向异性，令振动方向垂直于光轴的 o 光与振动方向平行于光轴的 e 光产生一个 π 的相位差，故若一束线偏振光入射，其出射光与入射光相对光轴对称。可以推出若将 $1/2$ 波片角度转动一个角度 α ，检偏器应同方向转动角度 $\theta = 2\alpha$ 才可以实现消光。对测得检偏器偏转角 θ 和 $1/2$ 波片偏转角 α 进行线性拟合，计算直线斜率验证上述结论：

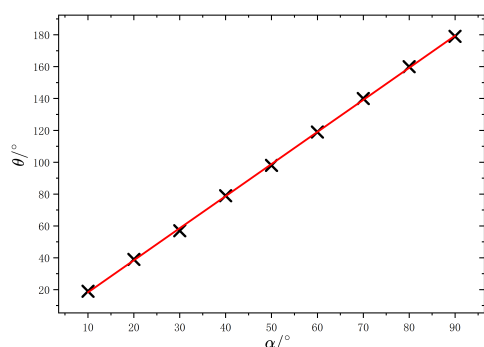


图 4 检偏器偏转角 θ —波片偏转角 α 关系

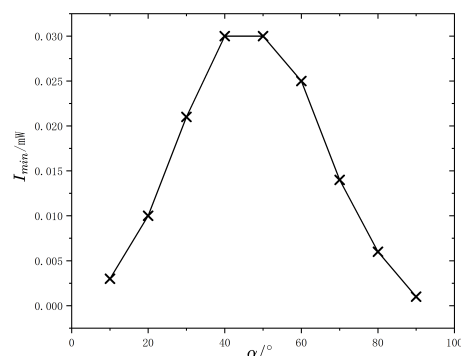


图 5 最小光强 I_{min} —波片偏转角 α 关系

拟合得到 $R^2 = 0.9998$ ，斜率 $k = 2.02 \pm 0.01$ ，截距 $b = -1.86^\circ$ ，在误差范围内可以认为 $\theta = 2\alpha$ 关系成立，验证了 $1/2$ 波片能使 o 光与 e 光产生一个 $(2k + 1)\pi$ 的相位差，使出射光与入射光相对光轴对称。

实验中可以发现，随着 α 的变化，测得的最小功率并不为零，且呈现出先增大后减小的趋势，在 45° 时达到最大。分析其原因，可能是由于波片制作不够精确，使得 o 光 e 光相位差相较于 $(2k + 1)\pi$ 有一个小的偏差，使得线偏振光射入波片变为椭圆偏振光，且该椭圆很扁。随角度趋于 45° ，椭圆短轴达到极大，故此时检偏器最小光强达到极大值。 [?]

4.4 1/4 波片合成 1/2 波片验证

调节两偏振片达到消光位置后，将两个 1/4 波片先后放入光路再分别调节到消光状态，此时两个 1/4 波片光轴平行。旋转起偏器，转过角度 θ_1 ，再调节检偏器至消光，检偏器反向旋转相同角度 θ_2 ，可证明组成了 1/2 波片。

表 2 起偏器偏转角 θ_1 —检偏器偏转角 θ_2 对应关系（负号表示旋转反向）

$\theta_1/^\circ$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\theta_2/^\circ$	-10	-20	-31	-40	-50	-61	-70	-80	-90

如表所示，在误差范围内可以认为 2 个光轴平行的 1/4 波片组成了 1/2 波片。

五、 结论

本实验测量验证了马吕斯定律；定性研究了 1/4 波片转过不同角度后经过它的线偏振光的振动状态改变，发现波片转过非特殊角度后线偏振光后会变成椭圆偏振光，转过 45° 时会变近似圆偏振光（并讨论了不严格为圆偏振光的可能原因），转过 90° 时仍为线偏振光，同时定量测量了波片转过 30° 时其一周的光强分布，极坐标下作图并用理论公式拟合；定量测量了线偏光经过 1/2 波片后，达到最小功率时检偏器转过角度应为波片转过角度的两倍，并讨论了最小功率随波片转过角度变化的可能原因；研究了两片 1/4 波片合成 1/2 波片的方法，使两光轴平行即可。

六、 参考文献

- [1] 郑林, 冯利, and 许济金. 大学物理实验. 中国科学技术大学出版社, 合肥, 2015. University Physics Experiments.
- [2] 罗文慧廖炎昌. 验证马吕斯定律的实验方法. 物理实验, (06):34–35, 2001.
- [3] 钟锡华. 现代光学基础. 北京大学出版社, 北京, 2003.
- [4] 王平 and 陈宇. 偏振光经 1/4 波片后偏振态变化的理论分析. 中国科技信息, (22):323+325, 2007.