

偏振光的研究

廖荣

中国科学技术大学 物理学院, 合肥 230026

摘要: 光的偏振是指光的振动方向不变, 或光矢量末端在垂直于传播方向平面上的轨迹呈椭圆或圆的现象。本实验对光的偏振态进行研究并利用光的偏振特性进行各种分析和测量工作, 测量了半导体激光器的偏振度; 对马吕斯定律进行验证; 根据布儒斯特定律设计实验方案测定了玻璃介质的折射率; 并利用偏振片和 1/4 波片对实验室液晶屏所发出光线的偏振状态进行了研究。

关键词: 光的偏振; 马吕斯定律; 布儒斯特定律

Study of Polarized Light

Rong Liao

School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract: Polarization of light refers to the phenomenon that the vibration direction of light is unchanged, or the trajectory of the end of the light vector in the plane perpendicular to the direction of propagation is elliptical or circular. In this experiment, the polarization state of light is studied and the polarization characteristics of light are used to analyze and measure the polarization degree of semiconductor laser. Verify Malus' law; According to Brewster's law, the experimental scheme is designed to measure the refractive index of glass medium. The polarization state of the light emitted from the laboratory liquid crystal screen was studied by using a polarizer and a quarter wave plate.

Keywords: Polarization of light; Malus's law; Brewster's law

1 实验原理

1.1 产生偏振光的元件-偏振片

偏振片利用聚乙烯醇塑胶膜制成, 具有梳状长链形分子, 这些分子平行排列在同一方向上, 胶膜只允许垂直于排列方向的光振动通过, 因此产生线偏振光。优点是价格便宜, 且可以得到大面积偏振光。本实验中采用偏振片作为起偏器和检偏器。[1]

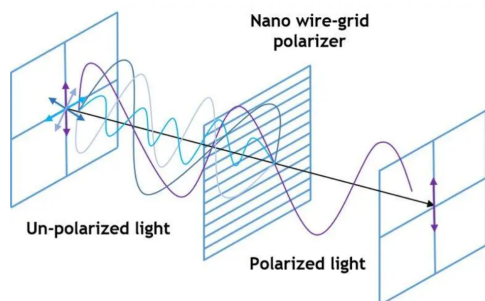


图 1: 偏振片的工作原理

1.2 改变光的偏振态的元件-波晶片

波晶片又称相位延迟片。它是从单轴晶体中切割下来的平行平板 (其光轴方向与平面平行), 由于波晶片内 o 光和 e 光的传播速度 v_o 、 v_e 不同 (折射率 n_o 、 n_e 不同), 所以造成 o 光和 e 光通过波晶片的光程也不同。当两束光通过厚度为 d 的波晶片后, o 光的相位相对于 e 光的延迟量为:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d \quad (1)$$

若满足 $(n_o - n_e)d = m\lambda \pm \lambda/4$, 即 $\Delta = 2m\pi \pm \pi/2$, 我们称之为 1/4 波片, 也可记为 $\lambda/4$ 片; 若满足 $(n_o - n_e)d = m\lambda \pm \lambda/2$, 即 $\Delta = 2m\pi \pm \pi$, 我们称之为 1/2 波片, 也可记为 $\lambda/2$ 片; 若满足 $(n_o - n_e)d = m\lambda \pm \lambda$, 即 $\Delta = 2m\pi \pm 2\pi$, 我们称之为全波片 (m 为整数)。

波晶片可以用来改变光的偏振态, 如 2 所示, 在起偏器后加上一个 $\lambda/4$ 片, 旋转起偏器或 $\lambda/4$ 片就可以得到椭圆或者圆偏振光。 $\lambda/4$ 片也是椭圆仪中

的重要元件，而椭圆仪可以精确测量薄膜的厚度和折射率，是材料科学研究中常用的精密仪器。

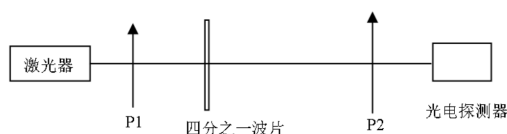


图 2: 用 $\lambda/4$ 片改变光的偏振态

1.3 布儒斯特定律

光在界面反射和透射时，反射光中的垂直于入射面的光振动（称 s 分量）多于平行于入射面的光振动（称为 p 分量）；而透射光线则正好相反。如果改变入射角，会出现一个特殊的现象，即入射角为某一特定值时，反射光成为完全线偏振光（s 分量），折射光为部分偏振光，而且此时的反射光线和折射光线垂直，这种现象被称为布儒斯特定律，这一特定的入射角被称为布儒斯特角 i_b ，如 3 所示。此时有

$$i_b + \gamma_0 = \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

$$n_1 \sin i_b = n_2 \sin \gamma_0 \quad (3)$$

$$t g i_b = \frac{\sin i_b}{\cos i_b} = \frac{\sin i_b}{\sin \gamma_0} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

若 $n_1 = 1$ (空气的折射率)，则

$$n_2 = t g i_b \quad (5)$$

所以可以通过测量布儒斯特角的大小来测量介质的折射率。

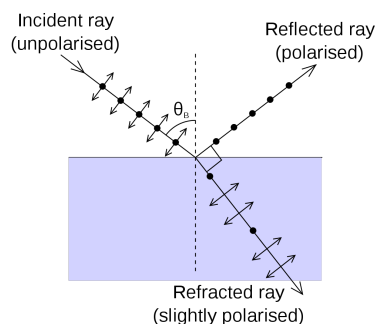


图 3: 布儒斯特定律原理图

2 实验内容

2.1 实验器材

1. 半导体激光器（波长 650nm）；
2. 硅光电池；
3. 起偏器；
4. 检偏器；
5. 旋转样品台；
6. 数字式检流计；
7. 待测玻璃介质；
8. $1/4$ 波片；
9. 实验室液晶屏。

2.2 实验步骤

2.2.1 仪器调节

(1) 打开数字检流计、半导体激光器预热 10 分钟；预热的过程中进行光路调整。

(2) 按 4 调整光路等高共轴。先安装偏振片 2，调整偏振片及激光器，使激光束入射到偏振片的中心，且其反射的光斑与激光器出口重合。再安装并调整偏振片 1，使激光束入射到偏振片 1 的中心，且其反射的光斑与激光器出口重合。



图 4: 实验光路图。1 为半导体红色激光器，2 为偏振片 1，3 为偏振片 2，4 为硅光电探头

(3) 检流计零点检查。数字检流器分为 1、2、3、4 档，量程依次增大，灵敏度依次递减。选择所需要的量程，将光电探头完全遮挡检查零点，使窗口显示为“-000”（负号闪烁）。本实验在同一档内完成测量。

(4) 安装光电探头，使激光束入射到光电探头中心。

2.2.2 测量半导体激光器的偏振度

以偏振片 1 为检偏器，测量半导体激光器的偏振度。旋转检偏器找到光强最强的位置，记录角度和光强值 I_{max} 。再旋转检偏器找到光强最弱的位置，记录角度和光强值 I_{min} 。根据公式计算激光的偏振度 P : [3]

$$p = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (6)$$

2.2.3 验证马吕斯定律

(1) 以偏振片 1 为起偏器获得线偏光，以偏振片 2 为检偏器验证马吕斯定律。

(2) 调整待检测的线偏光强度（衰减旋钮逆时针旋到底时，检流计示数不超过 1000）。

(3) 固定起偏器的角度，调整检偏器的角度。将检偏器旋转一周，检验光强是否超过线性区，且光强都在所选档量程范围内。

(4) 旋转检偏器，使得检流器示数最小，此时起偏器和检偏器透振方向垂直，对应透振方向夹角 θ 为 $-\pi/2$ 。

(5) 保持起偏器方向不变，并假定激光光强稳定，光强为 I_0 ；旋转检偏器使透振方向夹角 θ 从 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ ，每隔 $\pi/45$ 角度测量透射光强，列表记录检偏器的角度及透射光强。

(6) 透振方向夹角 θ 为 0 时的光强值记为 I_0 ，作出 $I/I_0 \sim \cos^2\theta$ 的关系曲线 ($0 \sim \pi/2$, $-\pi/2 \sim 0$ 各一条，用最小二乘法求出斜率和截距，根据马吕斯定律斜率应为 1，截距应为 0，分析实验的误差)。

2.2.4 利用布儒斯特定律测定玻璃介质折射率

(1) 以偏振片 1 为起偏器，调整起偏器角度，使得光线偏振方向与光学平台平面平行。

(2) 将待测玻璃介质放置在旋转样品台上。

(3) 转动样品台，使激光束入射到待测玻璃的中心，且其反射的光斑与激光器出口重合。记录此时的角度。

(4) 转动样品台，找到激光束在入射待测玻璃后的反射光线最暗的位置，记录此时的角度。

(5) 重复 (3) (4) 六次，处理数据，分析误差。

2.2.5 判断实验室液晶屏所发出光线的偏振状态

利用偏振片和 1/4 波片观察实验室的液晶屏，根据所得现象判断偏振状态。

3 实验结果与讨论

3.1 测量半导体激光器的偏振度

3.1.1 原始数据

表 1: 半导体偏振度测量原始数据

I_{max}	θ	I_{min}	θ
807	196.0	0	107.5
803	17.5	0	287.5

表中 I_{max} 为光强极大值， I_{min} 为光强极小值， θ 为偏振片角度

3.1.2 数据处理

偏振度计算公式如下：

$$p = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (7)$$

计算结果为 $p = 1$ 。

3.2 验证马吕斯定律

3.2.1 原始数据

表 2: 验证马吕斯定律实验原始数据

θ	I	θ	I	θ	I	θ	I
-90	0	-42	602	6	807	50	552
-86	4	-38	639	10	803	54	503
-82	23	-34	673	14	794	58	447
-78	58	-30	700	18	782	62	382
-74	109	-26	726	22	766	66	297
-70	172	-22	748	26	747	70	218
-66	240	-18	766	30	722	74	142
-62	332	-14	782	34	696	78	84
-58	403	-10	793	38	664	82	40
-54	465	-6	802	42	632	86	12
-50	518	-2	808	46	590	90	0
-46	562	2	810				

表中 θ 为透振方向夹角, 单位为角度制; I 为透射光强, 为了方便计算, 在上述 46 组数据之外, 另外测得透振方向夹角为 0° 时得光强为 809。

3.2.2 数据处理

使用 Origin 对 $I/I_0 \sim \cos^2\theta$ 的关系进行最小二乘拟合, $-90^\circ \sim 0^\circ$ 和 $0^\circ \sim 90^\circ$ 分别讨论。

先对 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 进行讨论, Origin 拟合如下:

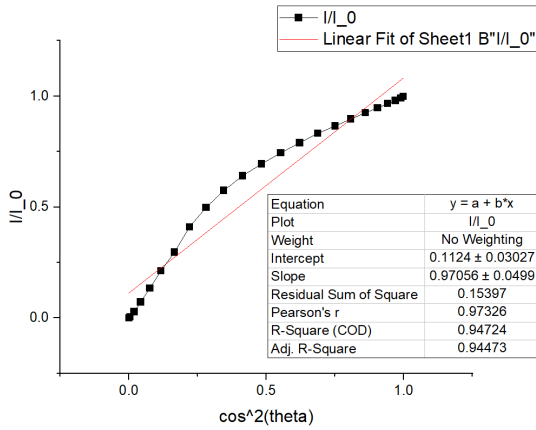


图 5: $-90^\circ \sim 0^\circ$, $I/I_0 \sim \cos^2\theta$ 关系

可得拟合结果, 斜率 $k_1 = 0.97 \pm 0.05$, 截距 $b_1 = 0.11 \pm 0.03, R^2 = 0.95$ 。

再对 $0^\circ \sim 90^\circ$ 进行讨论, Origin 拟合如下:

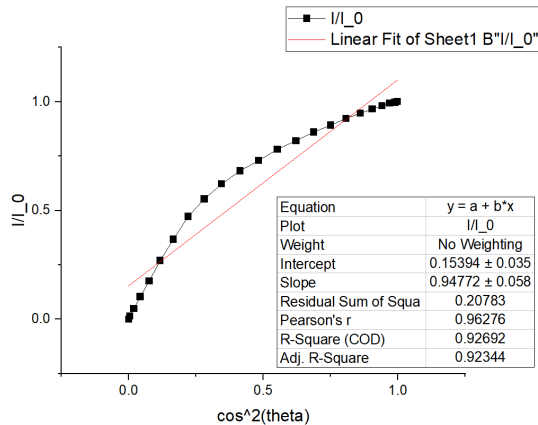


图 6: $0^\circ \sim 90^\circ$, $I/I_0 \sim \cos^2\theta$ 关系

可得拟合结果, 斜率 $k_1 = 0.95 \pm 0.06$, 截距 $b_1 = 0.15 \pm 0.04, R^2 = 0.93$ 。

3.3 利用布儒斯特定律测定玻璃介质折射率

3.3.1 原始数据

表 3: 测定玻璃介质折射率原始数据

垂直时角度 $^\circ$	消光时角度 $^\circ$	布儒斯特角 $^\circ$
136.8	79.2	57.6
136.7	79.0	57.7
136.7	79.1	57.6
136.8	79.2	57.6
136.8	79.1	57.7
136.7	79.1	57.6

3.3.2 数据处理和误差分析

根据表格数据, 布儒斯特角平均值 $\bar{\theta} = 57.63^\circ$ 误差分析在置信概率 $P = 0.95$ 的条件下进行。六次测量的标准差为:

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\theta_i - \bar{\theta})^2}{6-1}} = 0.05^\circ \quad (8)$$

人眼观测分辨误差为 0.5° , 样品台误差为 1° , 故:

$$\Delta_B = \sqrt{\Delta_{instrument}^2 + \Delta_{person}^2} = 1.12^\circ \quad (9)$$

根据不确定度合成公式: [2]

$$u_A = \frac{\sigma_\theta}{\sqrt{6}} = 0.02^\circ \quad (10)$$

$$u_B = k_p \times \frac{\Delta_B}{C} = 1.96 \times \frac{1.12}{3} = 0.73^\circ \quad (11)$$

$$\begin{aligned} U_\theta &= \sqrt{(t_p \times u_A)^2 + (u_B)^2} \\ &= \sqrt{(2.57 \times 0.02)^2 + (0.73)^2} \\ &= 0.73^\circ \end{aligned}$$

转换到弧度制有 $\bar{\theta} = 1.01, U_\theta = 0.01$ 。

根据布儒斯特定律, 玻璃介质折射率与布儒斯特角的关系为:

$$n = \tan \theta \quad (12)$$

故玻璃介质折射率的平均值为:

$$\bar{n} = \tan \bar{\theta} = \tan 1.01 = 1.59 \quad (13)$$

不确定度传递公式为：

$$\begin{aligned} U_n &= \frac{n}{\tan\theta \cdot \cos^2\theta} U_\theta \\ &= \frac{1.59}{\tan 1.01 \cdot \cos^2 1.01} \cdot 0.01 \\ &= 0.04 \end{aligned}$$

最终结果为折射率 $n = \bar{n} \pm U_n = 1.59 \pm 0.04$
相对误差为 $2.5\% < 5\%$, 符合实验要求。

3.4 判断实验室液晶屏发光偏振状态

3.4.1 实验结果和结论

利用偏振片对液晶屏观察，不断旋转偏振片，视野中明暗交替变化，有消光现象，判断偏振状态为线偏振光。

3.5 分析与讨论

1. 如何鉴别部分偏振光和椭圆偏振光？

答：将两种偏振光的透光最强的方向正对 $1/4$ 波片的光轴方向入射 $1/4$ 波片。这样椭圆偏振光的出射光就变成了完全线偏振光。而部分偏振光还是部分偏振光。再通过一个偏振片，转动偏振片，有消光现象的是椭圆偏振光，没有消光现象的是部分偏振光。

2. 在摄影的过程中，如果能合理地利用偏振光的原理就可以消除表面反射光的影响，拍摄出效果更佳的照片（如7中左右的对比照片）。请简述如何实现这一拍摄过程。

首先调整相机的位置，使相机和玻璃面的夹角在大约 55 度（接近一般玻璃的布儒斯特角）。此时照射到玻璃上反射回来的光线为线偏振光，只需要使用偏振滤镜即可滤去反射光。



图 7: 拍摄效果对比图

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 偏振光的研究（实验讲义）.
- [2] 谢行恕, 康世秀, 霍剑青. 大学物理实验, 第二册, 第二版. 高等教育出版社, 北京, 2005.
- [3] 赵凯华. 光学. 北京大学出版社, 北京, 2018.