

# 偏振光的研究

唐延宇 PB22030853

2023 年 11 月 8 日

## 摘要

本实验通过测量半导体激光器的偏振度、利用硅光电探头和两块偏振片验证马吕斯定律、测量玻璃样品的布儒斯特角、利用偏振片和 1/4 波片定性判断光源的偏振态,观察了光通过偏振片、1/4 波片等光学元件时的行为,加深了对光偏振特性的认识.

## 1 实验目的

光的偏振性是其横波性质的一个重要体现. 在日常生活中,利用该特性可以一定程度上消除光线中的某一振动方向的分量,进而在摄影中消除漫反射光,达到提高成像效果的目的. 本实验通过测定偏振光的偏振度、验证马吕斯定律、测量样品的布儒斯特角、定性判断生活中的常见光源的偏振态等几项与光的偏振性息息相关的实验,来加强我们对于光的偏振性的认识.

## 2 实验内容

### 2.1 实验仪器

本实验使用的仪器有: 半导体激光器(波长 650 nm, 光强可调), 硅光电探头, 偏振片两个(分别作为起偏器与检偏器, 置于 360 分度度盘内), 旋转样品台, 光功率计(mW 量程数字检流计), 1/4 波片, 待测玻璃样品, 白色光屏等.

### 2.2 实验原理与实验方案设计

#### 2.2.1 激光器偏振度的测量

光的偏振度定义如下:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

故仅需将偏振片置于光电探头与激光器之间, 旋转偏振片一周, 寻找数字检流计读数的极大值与极小值, 记录数值以及极值出现对应的角度值即可.

### 2.2.2 马吕斯定律的验证

马吕斯定律表述如下：

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2)$$

式 (2) 中,  $I_0$  表示入射完全线偏振光的光强,  $\theta$  表示线偏振光振动方向与偏振片透振方向的夹角,  $I$  表示透过偏振片后的出射光强. 由此, 我们可按如下步骤验证马吕斯定律:

1. 调整光路, 保证元件共轴. 在激光器和光电探头间放入一块偏振片作为检偏器, 调节其高度, 是反射光斑与透射光重合, 从而确保共轴.
2. 在检偏器与激光器间放入第二块偏振片, 仿照1调节共轴, 作为起偏器. 之后旋转检偏器, 寻找数字检流计读数的极小值(完全为 0 或接近于 0), 记录极小光强值及对应的角度值  $\theta_0$ . 此处即为振动方向与透振方向夹角为  $90^\circ$  的位置.
3. 从光强极小值处开始, 沿同一方向转动偏振片, 每  $6^\circ$  记录一次透振方向夹角值  $\theta$  以及对应光强值  $I$ , 在第一次极大值出现后继续测量, 直至第二次观察到光强的极小值.
4. 记  $\theta = 0$  时的光强之为  $I_0$ , 绘制  $\frac{I}{I_0} - \cos^2 \theta$  曲线, 分析误差.

### 2.2.3 样品折射率的测量

光线在传播过程中, 遇到不同介质的分界面时, 一部分穿过界面射入另一种介质, 另一部分折回原介质, 这两种现象分别称为光的反射与折射. 描述光在介质表面的反射折射现象的正是如下的菲涅耳公式:

$$\begin{aligned} \tilde{r}_s &= -\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)} \\ \tilde{r}_p &= \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\tilde{r}_s, \tilde{r}_p$  分别表示  $s$  方向(垂直于入射光线与法线构成平面方向)与  $p$ (平行于光入射面方向)的电矢量的反射率.  $i_1, i_2$  分别为入射角与折射角. 则当  $i_1 + i_2 = \frac{\pi}{2}$  时, 有  $\tilde{r}_p = 0$ , 即反射光中的  $p$  分量完全消失, 又根据 Snell 定律有:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (4)$$

从而有:

$$n_2 = n_1 \tan i_1 \quad (5)$$

此时的入射角  $i_1$  即为布儒斯特角  $i_B$ . 若介质 1 为空气, 可近似认为  $n_1 = 1$ , 则测出布儒斯特角即可得到介质 2 的折射率. 如果入射光线仅有  $p$  分量, 则当它已布儒斯特角入射时, 反射光将会出现完全消光. 据此, 我们可设计如下的测量样品布儒斯特角的方案, 使用到的仪器主要有: 半导体激光器, 偏振片, 待测样品, 载物平台, 白色光屏.

1. 首先调节仪器共轴. 然后调整偏振片, 使得偏振片透振方向与光线入射方向处于同一平面内, 从而得到一束几乎全为  $p$  分量的偏振光.
2. 调节载物平台, 使光线垂直于样品光学平面入射, 记录此时载物平台的角度读数  $\theta_1$ .
3. 转动载物平台, 一边转动一边使用白色光屏观察反射光强度变化, 直到观察到完全消光或光强极小值出现. 在这一位置附近小幅度转动载物平台, 确认光强极小值或消光时的载物平台读数, 记为  $\theta_2$ .
4. 更换样品在载物平台上的放置位置, 重复上述操作, 记录三组数据.  $i_B = \theta_2 - \theta_1$  即为样品布儒斯特角的测量值.

### 3 数据处理

#### 3.1 实验数据

本实验测得的数据记录如表1,2,3所示, 原始数据请参见附件中的原始数据表格.

表 1: 半导体激光器偏振度测量数据记录表

序号	光强极大值	偏振片角度	光强极小值	偏振片角度
1	6.13	146°	1.03	58°
2	6.22	326°	1.03	239°

表2中的透振方向夹角  $\theta$  值已经过约化, 并非偏振片转盘上的原始读数. 在反向测量中, 表中数据已取  $\theta$  的绝对值.

#### 3.2 实验结果

##### 3.2.1 半导体激光器的偏振度

据表1可知:

$$I_{\max} = \frac{6.13 + 6.22}{2} = 6.175, I_{\min} = \frac{1.03 + 1.03}{2} = 1.03 \quad (6)$$

从而据式 (1) 可得, 偏振度为:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{6.175 - 1.03}{6.175 + 1.03} = 71.4\% \quad (7)$$

表 2: 验证马吕斯定律数据记录表

透振方向夹角 ( $\theta$ )	透射光强 ( $I$ )	透振方向夹角 ( $\theta$ )	透射光强 ( $I$ )
反向测量数据		正向测量数据	
90°	0	0°	5.07
84°	0.08	6°	4.99
78°	0.27	12°	4.82
72°	0.56	18°	4.52
66°	0.98	24°	4.14
60°	1.40	30°	3.71
54°	1.90	42°	2.59
48°	2.45	48°	2.14
42°	2.97	54°	1.61
30°	3.98	60°	1.12
24°	4.37	66°	0.72
18°	4.66	72°	0.38
12°	4.92	78°	0.15
6°	5.05	84°	0.02
6°	5.07	90°	0

### 3.2.2 马吕斯定律的验证

利用 Origin 软件作出的反向、正向  $\frac{I}{I_0} - \cos^2 \theta$  曲线如图1,2所示. 从图中可知, 拟合斜率、截距及其不确定度, 相关系数如下:

反向:

$$k = 1.00486 \pm 0.01002, b = 0.01531 \pm 0.00621, r = 0.99931 \quad (8)$$

正向:

$$k = 1.00699 \pm 0.01133, b = -0.02315 \pm 0.00702, r = 0.99911 \quad (9)$$

其中  $k, b, r$  分别为拟合的斜率、截距、皮尔逊相关系数. 由图可见, 拟合效果非常好: 斜率非常接近 1, 截距相当接近 0, 相关系数几乎为 1.

### 3.2.3 样品折射率的测量

据表可知, 样品布儒斯特角测量均值为:

$$\hat{i}_B = \frac{(222 - 165) + (131 - 74) + (247 - 190)}{3} = 57^\circ \quad (10)$$

从而样品折射率测量均值为:

$$\hat{n} = \tan \hat{i}_B = 1.54 \quad (11)$$

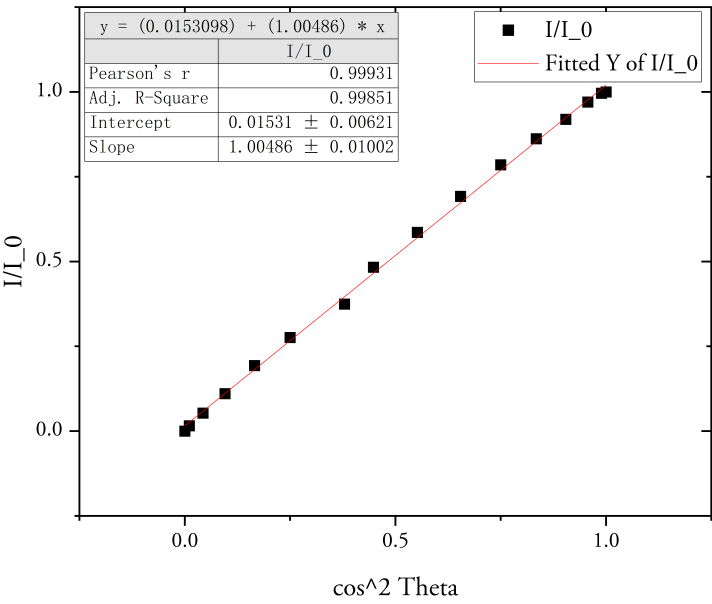


图 1:  $\frac{I}{I_0} - \cos^2 \theta$  曲线-反向

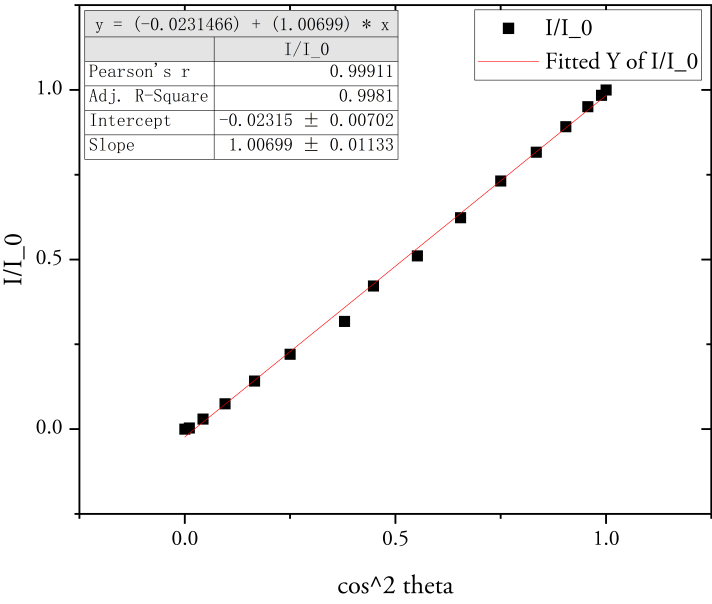


图 2:  $\frac{I}{I_0} - \cos^2 \theta$  曲线-正向

表 3: 布儒斯特角测量数据

序号	$\theta_1$	$\theta_2$
1	165°	222°
2	74°	131°
3	190°	247°

### 3.2.4 不同光源偏振度的鉴定

具体鉴别方法将在第5节中讨论, 下面给出简要结果:

- 教室大屏: 通过偏振片观察, 旋转偏振片出现两次完全消光, 故为线偏振光.
- 手机屏幕: 透过偏振片观察, 旋转偏振片时可观察到光强的极大、极小值, 但未出现完全消光; 进一步加入 1/4 波片后旋转偏振片, 仍未出现完全消光, 故为部分偏振光.

## 4 误差分析与不确定度计算

### 4.1 不确定度计算

下面来计算样品折射率的不确定度. 查表可知, 当  $p = 0.95, \nu = n - 1 = 2$  时,  $t_{0.95} = 4.30, k_{0.95} = 1.960$ . 又载物平台允差  $\Delta = 1^\circ$ , 且其误差服从正态分布, 取  $C = 3$ , 则布儒斯特角的不确定度可如下计算:

$$\begin{aligned}
 U_{i_B} &= \sqrt{\left(t_{0.95} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(k_{0.95} \frac{\Delta}{C}\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(4.30 \times \frac{\sigma}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(1.960 \times \frac{1^\circ \times \pi}{3 \times 180^\circ}\right)^2} \\
 &= 0.01 \quad (p = 0.95)
 \end{aligned} \tag{12}$$

据式 (5), 不确定度将以如下方式传递:

$$\begin{aligned}
 U_n &= \frac{U_{i_B}}{\cos^2 i_B} \\
 &= \frac{0.01}{\cos^2 57^\circ} = 0.04 \quad (p = 0.95)
 \end{aligned} \tag{13}$$

故样品折射率测量结果最终可表示为:

$$n = 1.54 \pm 0.04 \quad (p = 0.95) \tag{14}$$

## 4.2 误差分析

本实验的误差主要有以下来源：

- 调节偏振片和载物平台时，角度读数的误差
- 环境光及实验者操作时可能产生的遮挡等因素对光电探头测得数据的影响
- 光剧组的共轴性无法精确保证
- 测量布儒斯特角时，无法保证入射光完全是  $p$  光，这可能导致无法观察到完全消光，而仅能观察到光强极小值。

## 5 思考题

### 1 如何鉴别部分偏振光和椭圆偏振光？

下面阐述光的偏振态的鉴别方法：

- (a) 首先将一偏振片置于光源和观察者之间，旋转偏振片，观察光强变化情况。若出现两次完全消光，则为线偏振光；若出现光强的极大极小值，但未完全消光，则为部分偏振光或椭圆偏振光；若光强几乎无变化，则为自然光或圆偏振光。
- (b) 对于自然光和圆偏振光：可在光源与偏振片间加一  $1/4$  波片，之后旋转偏振片，若旋转过程中出现消光，则为圆偏振光，否则为自然光。
- (c) 对于部分偏振光与椭圆偏振光：可在光源与偏振片间加一  $1/4$  波片，同时保证  $1/4$  波片光轴方向与上述光强极大值出现的透振方向重合，之后旋转偏振片，如果出现消光，则为椭圆偏振光，否则为部分偏振光。

### 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(见讲义)。请简述如何实现这一拍摄过程。

相机的偏光镜由两块偏振片组成，其中一片与镜头胶合，固定不动；而另一片可以旋转。对于非金属表面的反射光，如水面反射光、天空漫反射光等，它们一般属于完全或近似线偏振光，可以通过旋转偏振片滤去这部分光，从而使拍摄的照片对比度更加鲜明，天空色泽更加纯净，水体更加清澈。对于金属表面的反射光，由于金属电导率不为 0，反射系数变为复数，导致入射波与反射波出现位相变化，形成的一般是椭圆偏振光，因而往往无法用相机的偏光镜滤去。