

偏振

2024 年 6 月 12 日

摘要

本实验实际观察了光的偏振特性，并通过相关测量，学习了如何确定偏振片轴的方向，验证了透射光强与透射轴夹角的关系，并研究了 1/4 玻片，1/2 玻片和全玻片的特性。

1 观测布儒斯特角和偏振器的特性

1.1 原理

将电磁波分解为两个正交的矢量 P, S。P 代表平行于入射面，S 垂直于入射面。根据菲涅耳公式，在特定的角度，可以使 P 光的反射率为 0，这样放射光就变成了完全线偏光。这个特定的角度就是布儒斯特角。由菲涅耳公式可知：此时 $\theta_i + \theta_t = \frac{\pi}{2}$ ，故有 $\theta_B = \arctan n$ 。

为了检验偏振光，我们必须知道偏振光通过偏振片后的光强规律，即马吕斯定律。设光场振动方向和透射轴方向成 θ ，有： $T_\theta = (T_1 - T_2) \cos^2 \theta + T_2$ 。

1.2 实验过程及数据分析

首先我们测定布儒斯特角和起偏器 B 的透射轴夹角，我们先读出正入射时的方位角，转动平台，找到反射光能完全被偏振片消光的位置，这就是布氏角的位置，对应的起偏器角度就是透射轴在水平方向上的角度。（因为我们通过光路确保入射面水平，处于布氏角时透射轴水平能实现完全消光）为了减少误差，在扰动后重复上述过程，测量三次取平均。结果如下表：

开始时平台方位角	354°05′
α_{B_i}	P_{para_i}
297.5°25′	89.2°
297.5°28′	89.0°
297.5°13′	89.5°

表 1: 布氏角与起偏器透射轴

得到平均值 $\alpha_B = 297.5^\circ 22'$ ，故而布氏角测量值 $\theta_B = 56.5^\circ 17'$ ，折射率 $n = 1.532$ 。同时，取平均，起偏器的透射轴在水平方位的方位角为 $P_{para_i} = 89.23^\circ$ 。

进一步，来验证马吕斯定律。使用光强探测器，调整两偏振片（起偏器 P 和检偏器 A）的夹角，在不同夹角下，测定光强 I_m ，结果如下表：

$\theta(^{\circ})$	0.0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	80.0	84.0	87.0	90.0
$I_m(mV)$	6.247	5.821	4.672	3.117	1.561	0.429	0.197	0.078	0.023	0.006

表 2: 马吕斯定律

测量中， $R = 100\Omega$ ，偏正器 P 透射轴在水平方向的方位角同上。为验证马吕斯定律，将数据归一化，并做出图，如下图：

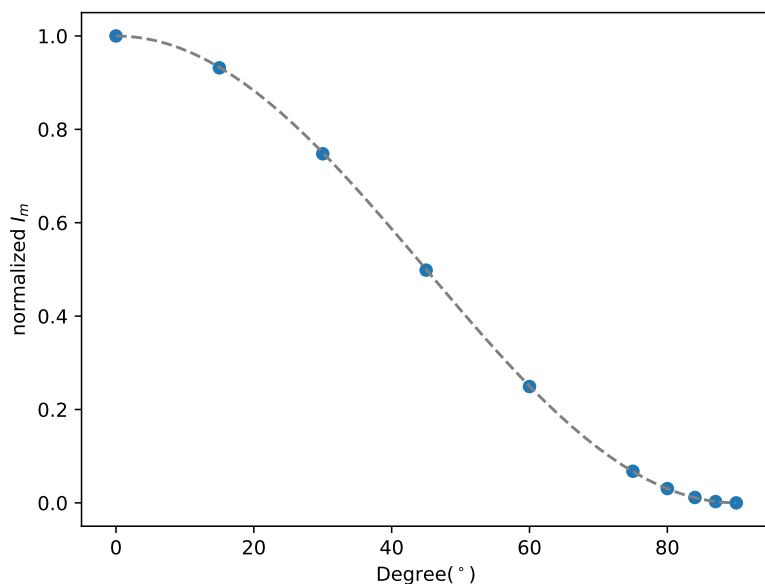


图 1: 马吕斯定律验证

残差平均值为：-0.004，很接近 0。图中实验所测点几乎都落在了虚线上。说明理论与实验符合良好，马吕斯定律得到了验证。

2 波片的特性研究

2.1 原理

除了常规的某个轴透光的偏振片，还有“推迟器”。其作用是利用快轴与慢轴的折射率不同，使快慢轴之间的电场产生相位差。而这一相位差又会改变偏振光的偏振态。通过测定这样的偏振态我们就可以知道待测推迟器的性质。

2.2 实验过程及数据分析

首先我们有两个 $1/4$ 玻片，其中之一已知快轴的大致方向，我们需要知道其轴方向。将待测波片 C 放在已正交消光的偏振器 P 和 A 之间，旋转 C ，三者仍消光时， C 的轴方向便平行于 P 的透射轴方向。这是由于对于线偏光而言，若光与轴之间有夹角，经过 $1/4$ 玻片后变为圆或者椭圆偏光，无法完全消光，故保证完全消光可保证快慢轴方向与透射轴方向相同。通过光强探测器来观测消光情况，尽量调整到完全消光。偏振片 P ， A 的配置与第一部分实验相同。最终结果如下：

C_0 快轴在竖直方向（快轴大致沿偏振片的白点方向，由此可区分快慢轴），示数为 $C_0 = 65.3^\circ$ 。 C_x 的某个轴在竖直方向时，示数为 $C_x = 222^\circ$ 。

下面探究将两个 $1/4$ 玻片组合会等效得到什么。通过偏振片的矩阵表达推导可知，当两玻片轴平行或者正交的时候，要么等效于全玻片（快轴正交），要么等效于 $1/2$ 玻片（快轴平行）。

先使 C_0 快轴与上面测定的 C_x 的轴平行（都在竖直方向），改变起偏器产生的偏振光的水平夹角，通过调整检偏器使其消光，得到消光时检偏器的竖直夹角，结果如下表：

起偏与水平夹角 $\beta(^{\circ})$	15.0	30.0	45.0
检偏与竖直夹角 $\alpha(^{\circ})$	12.5	27.4	43.2

表 3: 双 $1/4$ 玻片组合 1

在这一情况下，消光方向与竖直方向的夹角近似相当于偏振方向与水平方向的夹角。如下图所示：

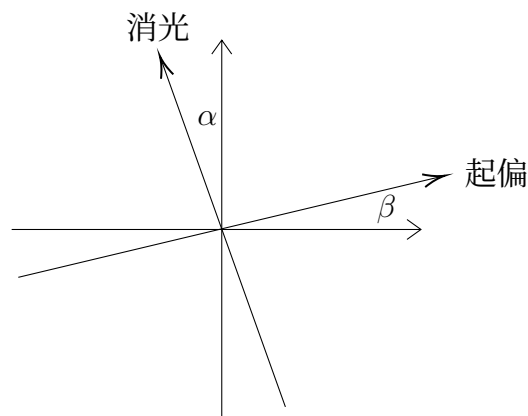


图 2: 情况一示意图

消光垂直于起偏，线偏振的特性几乎不变，也就是这相当于全玻片。进一步，前述 C_x 的轴指的是其慢轴。

类似的，使 C_0 快轴与上面测定的 C_x 的轴垂直。也就是将 C_0 的快轴调整到水平方向 ($C_0 = 155.3^\circ$)。在此基础上改变起偏器产生的偏振光的水平夹角，通过调整检偏器使其消光，得到消光时检偏器的竖直夹角，结果如下表：

起偏与水平夹角 $\beta(^{\circ})$	15.0	30.0	45.0
检偏与竖直夹角 $\alpha(^{\circ})$	165.5	149.2	130.1

表 4: 双 $1/4$ 玻片组合 2

在这一情况下， α 与 β 近似互补，如下图：

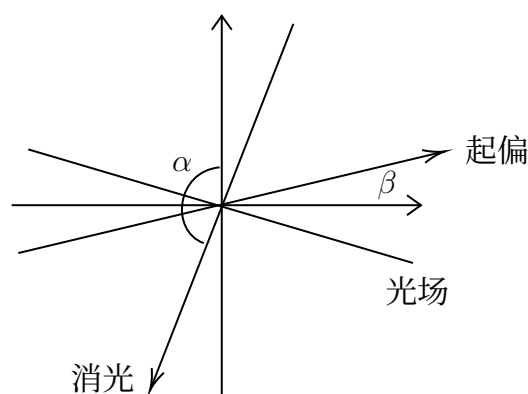


图 3: 情况二示意图

此时，起偏方向与消光方向近似对称。这就是半波片的效果。

综合以上， C_x 的快轴与位置轴方向应垂直，即位于读数为 132° 处。

线偏光经过 $1/4$ 玻片时，会变为椭圆偏振光（圆偏光也是特殊的椭圆偏振，只是长短轴相等）。让线偏光经过 C_0 ，观察其通过 $1/4$ 玻片时的特性。只用一个 $1/4$ 玻片，快轴置于竖

直方向，起偏器和检偏器按前面的方式设置，与上面调整起偏器与检偏器的位置的做法相同，只不过要寻找检偏器的最大值（即长轴方向），得到下述结果：

起偏与水平夹角 $\beta(^{\circ})$	22.5	45.0	67.5
长轴与竖直夹角 $\alpha(^{\circ})$	92.9	72.7	4.0
$I_{max}(mV)$	4.175	2.433	2.553
$I_{min}(mV)$	0.583	2.065	0.505

表 5: 一个 $1/4$ 玻片的情况

当然，为了消除误差影响，完全挡住光源时， $I_0 = 0.005mV$ ，用该数据修正 I_{min} 和 I_{max} 进行下面的计算。由上述数据，可计算玻片的相延。由理论推导知，相位差 δ 满足 $|\sin \delta_r| = \frac{2\sqrt{I_{min}/I_{max}}}{\sin(2\beta)(1+I_{min}/I_{max})}$ ， δ_r 的符号有旋向和波的具体表达式（ δ 加在 x 方向还是 y 方向）决定，不过对椭圆长轴方位角的计算无影响，结果如下：

$$\beta = 22.5^{\circ}, \quad \sin \delta_r = 0.9248, \quad \delta_r = 67.64^{\circ}$$

$$\beta = 45.0^{\circ}, \quad \sin \delta_r = 0.9966, \quad \delta_r = 85.2^{\circ}$$

$$\beta = 67.5^{\circ}, \quad \sin \delta_r = 1.047, \quad \text{由于误差, 取 } \sin \delta_r = 1.0 \text{ 以进行下面的计算, } \delta_r = 90^{\circ}$$

最后计算长轴方位角，有两种算法，一是 $90^{\circ} - \alpha$ ，二是 $\Psi = \frac{1}{2} \arctan(\tan(2\beta) \cdot \cos(\delta))$ ，计算结果如下表：

$\beta(^{\circ})$	22.5	45.0	67.5
用 α 计算 ($^{\circ}$)	-2.9	17.3	86
用 δ 计算 ($^{\circ}$)	-10.41	45	90

表 6: 椭圆方位角

注意：在第一个结果中，由于转向规定以及超过 90 度带来的问题，故对最终结果取负。在 $\beta = 45^{\circ}$ 时，接近圆偏光，所以 Ψ 为任何值都是合理的，也可以看到较大的差距（这也是圆偏光带来的差距）；针对最后结果，由于两倍的 67.5° 超过了 \tan 的第一个分支，故而应该取 \tan 的第二个分支，得到 $\arctan(0) = 180^{\circ}$ 。虽然存在误差，但是在可接受的范围内。

3 讨论

在前述实验中，所谓消光，实际上是取光强探测器的读数最小值。不同设备的消光的数值不同，有 0，有正，有负。这是由于光强探测器本身就有轻微的电，在不加负载光电流的情况下就可能出现 0，正，负。而实验空间本身就有光强。种种因素叠加，便使得该读数的绝对值意义不大，真正有用的是相对值。因此确保读数最小即可认为是消光。

另外，实际偏振片是不能得到完美的线偏光的。所以在最后的实验中，即便设置为 45° 我们仍能看到最大值和最小值，只不过差距较小。还是一个椭圆偏振光。

A 附录

原始数据见下表:

提示: 1本实验“灰色标记”数据, 让教师检查后再进行后面的实验; 2本实验涉及原始数据处理的部分, 除需要教师检查的, 在课后完成。3. a: 检偏器A(盘)的方位角; p: 起偏器P(盘)的方位角。

4观测布儒斯特角、起偏器P的透射轴在水平方向的方位角
光束正入射棱镜表面时平台方位角 $\alpha_{i=0} = 297.5^\circ$; 入射角为布氏角时平台方位角 $\alpha_{B1} = 297.25'$ ($\alpha_B - \alpha_{i=0} = 56.5^\circ 20'$)、
 $P_{\leftrightarrow 1} = 89.2^\circ$; $\alpha_{B2} = 297.5^\circ 28'$ $P_{\leftrightarrow 2} = 89.0^\circ$; $\alpha_{B3} = 297.5^\circ 13'$ $P_{\leftrightarrow 3} = 89.5^\circ$ 。
平均值 $\alpha_B = 297.5^\circ 22'$ 布氏角的测量值 $\theta_B = 56.5^\circ 17'$; 折射率 $n = 1.553$ 。

5偏振器透射轴方向
表4的3次平均值
起偏器P的透射轴在水平方向的方位角 $P_{\leftrightarrow}(\text{度})$ 89.23° 检偏器A和P正交时, A的方位角 a_{\uparrow} 182.9°

6透射光强 I_m 与两偏振器夹角 θ 的关系 $R = 100 \Omega$; $p = P_{\leftrightarrow}$ (平均值) = 89.23° ; $a_{\uparrow} = 182.9^\circ$;

夹角 θ (度)	0.0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	80.0	84.0	87.0	90.0
$a = a_{\uparrow} + 90 + \theta$ (度)	272.9	287.9	302.9	317.9	332.9	347.9	362.9	377.9	392.9	407.9
I_m (mV) 测量值	6.247	5.821	4.672	3.117	1.561	0.429	0.107	0.078	0.023	0.006

7定波片 C_0 的快轴的方向(度) $R = 100 \Omega$; $p = P_{\leftrightarrow}$ (平均值) = 89.23° ; $a = a_{\uparrow} = 182.9^\circ$ 。
波片 C_0 快轴在竖直方向时, 度盘示值 $C_0 = 65.3^\circ$ 。

8定波片 C_x 的轴的方向(度) $R = 100 \Omega$; $p = P_{\leftrightarrow}$ (平均值) = 89.23° ; $a = a_{\uparrow} = 182.9^\circ$ 。
波片 C_x 的1个轴在竖直方向时, 度盘示值 $C_x = 221^\circ$ 。

9&10线偏振光通过1/2波片或全波片
9) C_x 某轴在竖直方向, 度盘示值 $C_x = 221^\circ$ 。 C_0 快轴在竖直方向。
10) C_x 方位不变, C_0 快轴在水平方向, $C_0 = 155.3^\circ$ 。

$\beta = p - p_{\leftrightarrow}$ (度)	15.0	30.0	45.0
p	104.2	119.2	134.2
消光时A盘度盘读数 a_i (度)	104.2	119.2	134.2
$\alpha = a_i - a_{\uparrow}$ (度)	125.1	140.1	155.1

建议: 每个 β 角测量前: A盘方位角初始化到 a_{\uparrow} 。

11线偏振光经过1/4波片 $C_0 = 65.3^\circ$ $R = 100 \Omega$

$\beta = p - p_{\leftrightarrow}$ (度)	22.5	45.0	67.5
p (度)	111.7	134.2	156.7
A盘透射轴在长轴方向时的 a_i (度)	275.8	255.6	235.4 186.9
I_{\max} (mV) (最大光强)	4.175	2.423	2.553 2.553
I_{\min} (mV) (最小光强)	0.583	2.065	0.505
$\alpha = a_i - a_{\uparrow}$ (度)	92.9	72.7	4.0
利用 α 计算长轴方位角 ψ (度)	45.5 20.0		
$b^2/a^2 \approx I_{\min}/I_{\max}$			
利用(13)式计算 $\sin \delta_r$			
δ_r (度)			
利用(2)式计算 ψ (度)			

建议: 每个 β 测量前: A盘方位角初始化到 a_{\uparrow} 。

ψ : 转换到 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 区间

I_0 : 反应背景光、光电池暗电流、噪声、寄生电势和电表零点漂移等的综合影响。