

# 偏振光的研究

## 实验要求：

### 1. 预习阶段

- (1) 认真阅读实验讲义。可查阅与实验相关的资料。
- (2) 观看实验讲课视频（地址：<http://jxzy.ustc.edu.cn/jxzy/student/yuxi/show.aspx?id=2002>）。
- (3) 在预约选课系统中完成在线预习测试。在线测试只能完成一次，请大家完成实验讲义的预习后再作答。**答题开始时间：上课开始后 0.4 小时，提交截止时间：上课开始后 1.5 小时。**

### 2. 实验阶段

- (1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。
- (2) 维护整洁的实验环境，不要将水杯、饮料等放在实验台上，不得在实验室内吃东西。
- (3) 爱护实验设备，轻拿轻放。在老师讲解后才能动手操作。并且在动手前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。
- (4) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。
- (5) 实验数据签字前，先登陆预约选课系统完成在线出门测。**答题开始时间：上课开始后 2 小时，提交截止时间：上课开始后 4 小时。**
- (6) 实验数据经指导老师签字、实验设备整理好后方可离开。

### 3. 报告撰写阶段

- (1) 本实验需要书写一份完整的实验报告。格式可参考讲义后面的模版。
- (2) 验证马吕斯定律时，绘出实验数据和线性拟合图，标明斜率、截距、标准差和相关系数。
- (3) 测定玻璃介质的折射率时，要求计算玻璃介质的折射率及其不确定度。
- (4) 回答思考题 1、2。

## 注意事项：

### 1. 爱护光学元件

光学实验中使用的大部分光学元件都是玻璃制成的，其光学表面经过精心抛光。使用时要轻拿、轻放，避免碰撞、损坏元件。任何时候都不要用手触及光学表面（镀膜片或光在此表面反射或折射），只能拿磨砂面（光线不经过的面一般都磨成毛面，如透镜的侧面，棱镜的上下底面等），不要对着光学元件表面说话、咳嗽、打喷嚏等。

### 2. 本实验用到激光，请注意安全，不要让强光射入人眼。

3. 过强的入射光会造成光电探头输出偏离线性、饱和，甚至损坏光电探头。为了保证光电探头输出的良好线性关系，请在测量过程中保证最大光强不要超过其线性范围。

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的平面上的轨迹呈椭圆或圆的现象。光的偏振现象最早是牛顿在 1704 年至 1706 年间引入光学的;马吕斯在 1809 年首先提出“光的偏振”这一术语,并在实验室发现了光的偏振现象;麦克斯韦在 1865 年至 1873 年间建立了光的电磁理论,从本质上说明了光的偏振现象。按电磁波理论,光是横波,它的振动方向和光的传播方向垂直,因此可以分成五种偏振态:自然光(非偏振光)、线偏振光、部分偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光。自然光是各方向的振幅相同的光,它的振动方向在垂直于光的传播方向的平面内可取所有可能的方向,没有一个方向占有优势。若把所有方向的光振动都分解到相互垂直的两个方向上,则在这两个方向上的振动能量和振幅都相等。线偏振光是在垂直于传播方向的平面内,光矢量只沿一个固定方向振动。部分偏光可以看成自然光与线偏光混合而成,即它有某个方向的振幅占优势。圆偏振光和椭圆偏振光是光矢量末端在垂直于传播方向的平面上的轨迹呈圆或椭圆。通过对偏振光的研究人们发明和制造了一些偏振光的元件,如:偏振片、波片和各种偏振棱镜等。利用光的偏振现象在物理学方面可测量材料的厚度和折射率,可以了解材料的微观结构。力学上利用偏振光的干涉现象检测材料应力分布,进一步应用于建筑工程学方面就可以检测桥梁和水坝的安全度。

## 实验原理

为了研究光的偏振态和利用光的偏振特性进行各种分析和测量工作,需要各种偏振元件:产生偏振光的元件、改变光的偏振态的元件等,下面分类介绍。

### 1、产生偏振光的元件

在激光器发明之前,一般的自然光源产生的光都是非偏振光,因此要产生偏振光都要使用产生偏振光的元件。根据这些元件在实验中的作用,分为起偏器和检偏器。起偏器是将自然光变成线偏振光的元件,检偏器是用于鉴别光的偏振态的元件。在激光器谐振腔中可以利用布儒斯特角使输出的激光束是线偏振光。

将自然光变成偏振光的方法有很多,一个方法是利用光在界面反射和透射时光的偏振现象。我们的先人在很早就已经对水平面的反射光有所研究,但定量的研究最早在 1815 年由布儒斯特完成。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 p 分量);而透射光则正好相反。在改变入射角的时候,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,这种现象称之为布儒斯特定律,这一特定的入射角称为布儒斯特角  $i_b$ ,如图 1 所示。该方法是可以获得线偏振光的方法之一。因为此时

$$i_b + \gamma_0 = \frac{\pi}{2}, \quad n_1 \sin i_b = n_2 \sin \gamma_0,$$

$$\operatorname{tg} i_b = \frac{\sin i_b}{\cos i_b} = \frac{\sin i_b}{\sin \gamma_0} = \frac{n_2}{n_1},$$

若  $n_1=1$ （空气的折射率），则

$$n_2 = \operatorname{tg} i_b \quad (1)$$

所以通过测量布儒斯特角的大小可以测量介质的折射率。

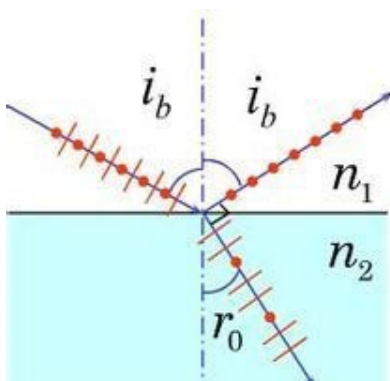


图 1. 布儒斯特定律原理图

由以上介绍可以知道利用反射可以产生偏振光，同样利用透射（多次透射）也可以产生偏振光（玻璃堆）。

第二种生产偏振光的方法是利用光学棱镜，如尼科耳棱镜、格兰棱镜等，它是利用晶体的双折射原理制成的。在晶体中存在一个特殊的方向（光轴方向），当光束沿着这个方向传播时，光束不分裂，光束偏离这个方向传播时，光束将分裂为两束，其中一束光遵守折射定律叫做寻常光（o 光），另一束光一般不遵守折射定律叫做非寻常光（e 光）。o 光和 e 光都是线偏振光（也叫完全偏振光），两者的光矢量的振动方向（在一般使用状态下）互相垂直。改变射向晶体的入射光线的方向可以找到光轴方向，沿着这个方向，o 光和 e 光的传播速度相等，折射率相同。晶体可以有一个光轴，叫做单轴晶体，如方解石、石英，也可以有两个光轴，叫双轴晶体，如云母、硫磺等。包含光轴和任一光线的平面叫对应于该光线的主平面，o 光电矢量的振动方向垂直于 o 光主平面，e 光电矢量的振动方向平行于 e 光主平面。

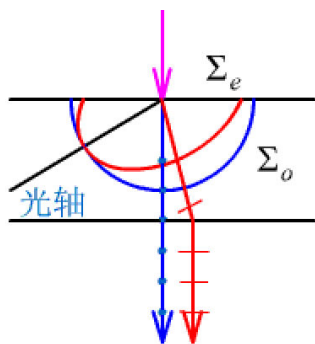


图 2. 晶体的双折射

格兰棱镜由两块方解石直角棱镜构成，两棱镜间有空气间隙，方解石的光轴平行于棱镜的棱。自然光垂直于界面射入棱镜后分为 o 光和 e 光，o 光在空气隙上全反射，只有 e 光透过棱镜射出。

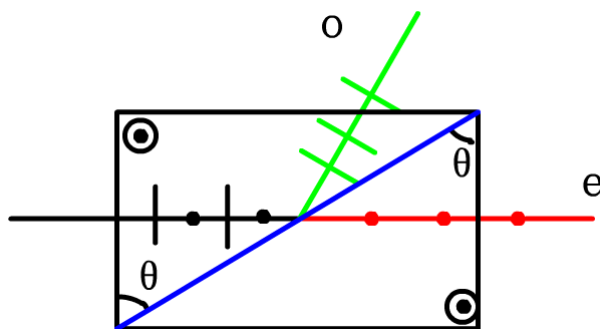


图 3. 格兰棱镜原理图

第三种是偏振片，它是利用聚乙烯醇塑胶膜制成，它具有梳状长链形结构分子，这些分子平行排列在同一方向上，此时胶膜只允许垂直于排列方向的光振动通过，因而产生线偏振光。它的偏振性能不如格兰棱镜，但优点是价格便宜，且可以得到大面积的。本实验中采用偏振片作为起偏器和检偏器。

## 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（其光轴方向与表面平行），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。当两光束通过厚度为  $d$  的波晶片后，o 光的相位相对于 e 光延迟量为，

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

若满足  $(n_o - n_e)d = m\lambda \pm \lambda/4$ ，即  $\Delta = 2m\pi \pm \frac{\pi}{2}$ ，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，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，如图 4 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[细节和方法参见文献 2、3]。 $\lambda/4$  片也是椭偏仪中的重要元件，而椭偏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。

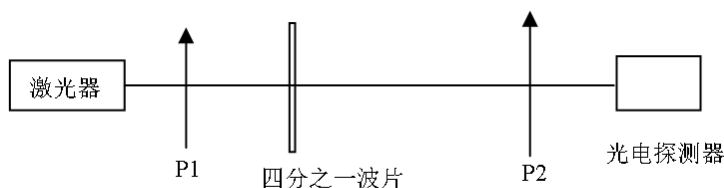


图 4. 用  $\lambda/4$  片改变光的偏振态

偏振光的研究从马吕斯定律开始，马吕斯定律也是最基本和最重要的偏振定律。马吕斯在 1809 年发现，一束光强为  $I_0$  的完全线偏振光通过检偏器后的光强  $I$  可表示为

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

其中， $\theta$  是检偏器的透振方向和完全线偏振光偏振方向的夹角。

## 实验内容：

### 基本内容部分（必做）：

本实验所使用的仪器如图 5 所示，主要包含 6 个组成部分：1. 半导体激光器（波长 650 nm）、2. 硅光电探头、3. 起偏器、4. 检偏器、5. 旋转样品台和 6. 光功率计（数字式检流计）。起偏器和检偏器均为偏振片，放在 360 分度度盘内。数字式检流计的测量范围  $1 \times 10^{-10} \text{A} \sim 1.999 \times 10^{-4} \text{A}$ 。1 档测量  $0.001 \sim 1.999 \times (10^{-7} \text{A})$  的光电流，内阻为  $10 \Omega$ 。2 档测量  $0.001 \sim 1.999 (\times 10^{-6} \text{A})$  的光电流，内阻小于  $1 \Omega$ 。3 档测量  $0.001 \sim 1.999 (\times 10^{-5} \text{A})$  的光电流，内阻小于  $0.1 \Omega$ 。4 档测量  $0.001 \sim 1.999 (\times 10^{-4} \text{A})$  的光电流，内阻小于  $0.01 \Omega$ 。测量误差小于  $\pm 0.5\% + 1$  个字。使用时先开机预热 5 到 10 分钟。检查衰减旋钮是否逆时针到底（注意动作要轻），此时灵敏度最高，数显窗口显示的为标准电流。如果测量相对值可将衰减旋钮放在其他位置。按下保持开关可保持当前数值，这时不论被测信号如何改变，光电流不变。



图 5. 实验仪器实物图

### 1. 仪器调节

(1) 打开光功率计（数字检流计）、半导体激光器预热 5 到 10 分钟；在预热的过程中可进行光路调整。

(2) 探测器零点检查。光功率计（数字检流计）有不同的档位（看表头小数点所在位置和单位），选择量程最大的档位。将光电探头完全遮挡或反扣在桌面上检查零点，此时窗口应显示为“0000”，

注意避免环境光进入。实验测量需要在同一档位内完成。



图 6. 实验光路图。1 半导体红色激光器，2 偏振片 1，3 偏振片 2，4 硅光电探头。

(3) 按图 6 调整光路共轴。先安装偏振片 2 和光电探头，调整激光器，使激光束入射到光电探头的中心，且偏振片反射的光斑与激光器出射口重合。

竖直方向调节：使偏振片 2 反射回来的光斑在竖直方向上与激光器出口重合。

水平方向调节：使激光光斑在水平方向上打在探测器的中心。

## 2. 测量半导体激光器的偏振度

以偏振片 2 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  $P$ ：

$$p = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4)$$

## 3. 验证马吕斯定律

(1) 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射口重合。光通过偏振片 1 后成为线偏光，以偏振片 2 为检偏器验证马吕斯定律。

(2) 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（衰减旋钮逆时针旋到底时，检流计示数不超过 1000），且光强都在所选档量程范围内。

(3) 如果入射到光电探头上的光强过强，检流计的示数与光强之间的关系会偏离线性，发生饱和，甚至损坏光电探头。为使得待检测的线偏光强度不超过光电探头的线性区，可以通过调节激光器的功率或起偏器的角度改变待检测线偏光强度。

(4) 旋转检偏器，使得光功率计（数字检流计）示数最小，此时起偏器与检偏器透振方向垂直，对应透振方向夹角  $\theta$  为  $90^\circ$ 。

(5) 保持起偏器方位不变，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  $\theta$  从  $90^\circ$  至  $-90^\circ$ ，每隔  $6^\circ$  测量经检偏器后的透射光强，列表记录检偏器的角度及透射光强；

(5) 透振方向夹角  $\theta$  为  $0^\circ$  时的光强值记为  $I_0$ ，作出  $I/I_0 \sim \cos^2\theta$  的关系曲线（ $0^\circ \sim 90^\circ$ ， $0^\circ \sim -90^\circ$  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）。



### 设计内容部分（必做）：

4. 利用已给实验仪器，根据布儒斯特定律，自行设计实验方案测定玻璃介质的折射率。
5. 利用已给实验仪器（偏振片、1/4 波片），判显示屏（教室里的大屏幕，手机屏幕等）或其他光源所发出光线的偏振状态（线偏振、圆偏振、自然光等）。给出判断结果及详细的判断过程。

### 选做内容：

6. 设计实验方案，实现圆偏振光（或椭圆偏振光）的产生及检验。

### 思考题：

1. 如何鉴别部分偏振光和椭圆偏振光？
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（如下图中左右的对比照片）。请简述如何实现这一拍摄过程。



图 7. 拍摄效果对比图

### 参考文献：

- [1] 《大学物理实验》第二册，谢行恕 康世秀 霍剑青主编，高等教育出版社
- [2] 《光学教程》姚启钧 高等教育出版社
- [3] 《光学》赵凯华，北京大学出版社

## 附录：偏振式 3D 电影原理演示实验仪

3D 立体电影的制作有多种形式，其中较为广泛采用的是偏振式。它以人眼观察景物的方法，利用两台并列安置的电影摄影机，分别代表人的左、右眼，同步拍摄出两条略带水平视差的电影画面。放映时，将两条电影影片分别装入左、右电影放映机，并在放映镜头前分别装置两个偏振片和快轴互成  $90^\circ$  度的  $1/4$  波片（与偏振片起偏方向夹角  $45^\circ$ ），分别产生左、右旋圆偏振光。两台放映机需同步运转，同时将画面投放在金属银幕上，形成左像右像双影。当观众戴上特制的偏光眼镜时，由于左、右两片偏光镜中的  $1/4$  波片的快轴互成  $90^\circ$  度，经过偏振片检偏后，致使观众的左眼只能看到左像、右眼只能看到右像，通过双眼汇聚功能将左、右像叠和在视网膜上，由大脑神经产生三维立体的视觉效果。展现出一幅幅连贯的立体画面，使观众感到景物扑面而来，能产生强烈的“身临其境”感。其光路原理如下图所示。

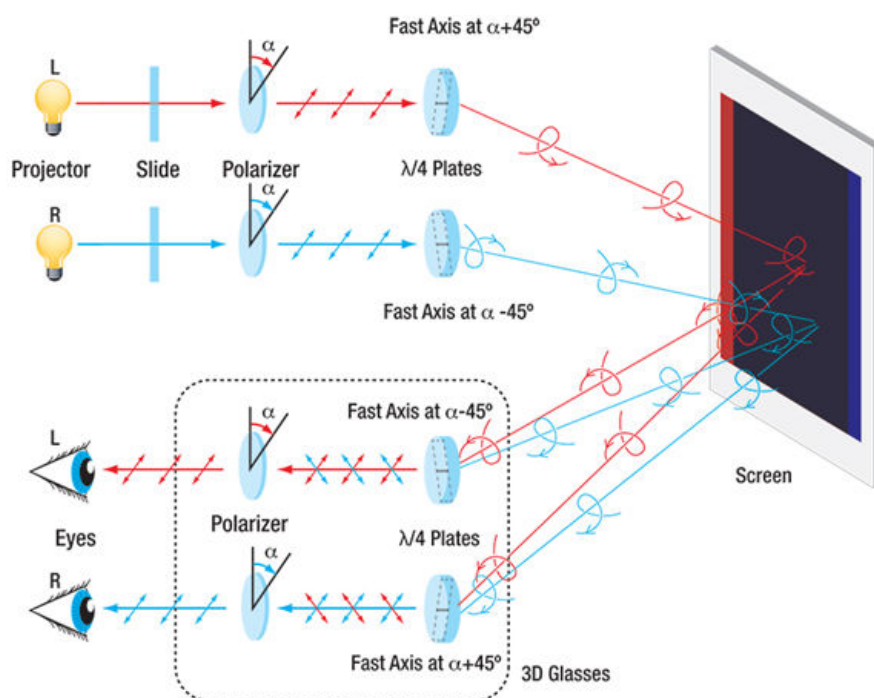


图 1. 3D 电影原理图

图 2 为实验室 3D 电影原理演示仪的实物图，该实验仪可以展示偏振式 3D 电影的成像原理，其光路结构与原理图 1 相同，仪器各部分光学元件的名称已在图中标出。

### 演示仪的操作及观看方式：

打开图 3 中的电源开关以启动光源，戴上配套的 3D 眼镜，坐在图 3 中的观察位置处观看，即可观察到立体画面。



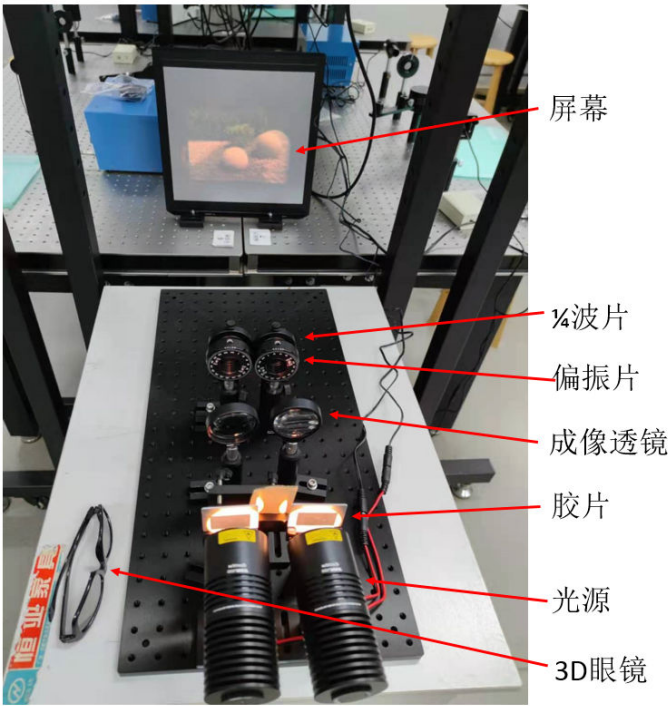


图 2. 3D 电影原理演示仪实物图

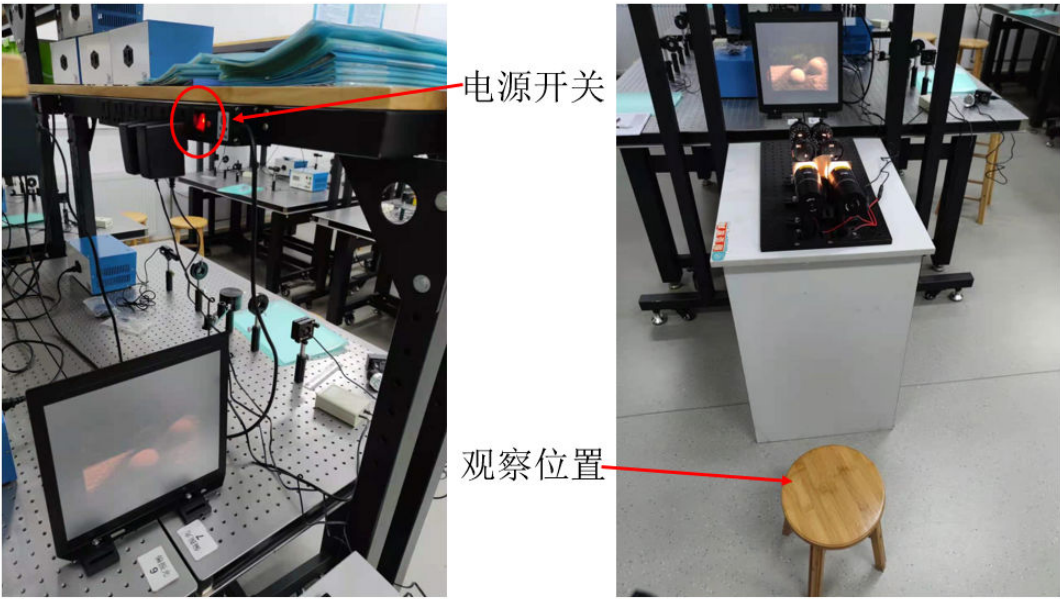


图 3. 仪器操作及观察方式

更新时间：2022.9

## 偏振光的研究 实验数据记录

姓名：\_\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_\_ 评分：\_\_\_\_\_

实验仪器：

实验数据：

## 1. 半导体激光器的偏振度

光强极大值	偏振片角度	光强极小值	偏振片角度

## 2. 验证马吕斯定律

透振方向夹角 ( $\theta$ )	透射光强 ( $I$ )	透振方向夹角 ( $\theta$ )	透射光强 ( $I$ )	透振方向夹角 ( $\theta$ )	透射光强 ( $I$ )	透振方向夹角 ( $\theta$ )	透射光强 ( $I$ )

## 3. 测量样品布儒斯特角（自行设计实验测量方案，写出详细的设计方案（原理、仪器、步骤，光路图等））

4. 判断教室大屏显示器所发出光线的偏振状态

任课教师签字：\_\_\_\_\_

## 偏振光的研究 实验报告模板

姓名：\_\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_\_ 评分：\_\_\_\_\_

**实验原理简述：**

**实验数据处理：**

1. 计算半导体激光器的偏振度
2. 验证马吕斯定律，绘出实验数据和线性拟合图，标明斜率、截距、标准差和相关系数。
3. 计算玻璃介质的折射率及其不确定度

**思考题：**

1. 如何鉴别部分偏振光和椭圆偏振光？
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。

**实验思考与讨论**