

实验 4.8 光的偏振

光波是电磁波，在自由空间中，其电场和磁场矢量互相垂直，且均垂直于传播方向。通常用电矢量代表光矢量，在与传播方向垂直的平面内，光矢量可能有各式各样的振动状态，称为光的偏振态。对光偏振现象的研究，使人们对光的传播规律有了新的认识，近年来基于光的偏振性开发的各种偏振光元器件和偏振光技术在现代科学技术中发挥了极其重要的作用。本实验学习几种偏振光的产生和检验。

【实验目的】

1. 观察光的偏振现象，了解偏振光的产生和检测方法。
2. 验证马吕斯定律。
3. 用电光转换技术测出椭圆偏振光的椭圆形状。

【仪器用具】

SGP-2A/3 型偏振光实验仪（如图 4.8.1 所示）



图4.8.1 SGP-2A/3型偏振光实验仪实物图

【实验原理】

1. 光的偏振

光的干涉和衍射现象揭示了光具有波动性，而光的偏振现象则证实了光波是横波。光的偏振现象在现代人的日常生活、娱乐活动和科学研究中都具有重要应用。

普通光源发出的光波没有偏振性。因为普通光源发出光波是由大量分子或原子在同一时刻发出的独立的光波列所组成的，各个波列的振动方向、振动频率和振动初相位都是随机的、各不相同。虽说各个独立的波列具有偏振性，但是由于各原子发光的随机性，导致了在与传播方向垂直的平面内光振动在各个方向上出现的概率均等、强度相同，且没有固定的相位差。具有这种性质的光称为自然光。普通光源发出的光都是自然光。

如果将自然光的光振动分别沿两个互相垂直的方向作正交分解，显然在这两方向上合振动的振幅相等，光能量各占自然光总能量的一半。为此我们可以用图 4.8.2 (a) 来表示自然光，图中小短线表示竖直方向的光振动，小圆点表示水平方向的光振动，短线和圆点的数量相等表示两个方向的光振动强度相同。

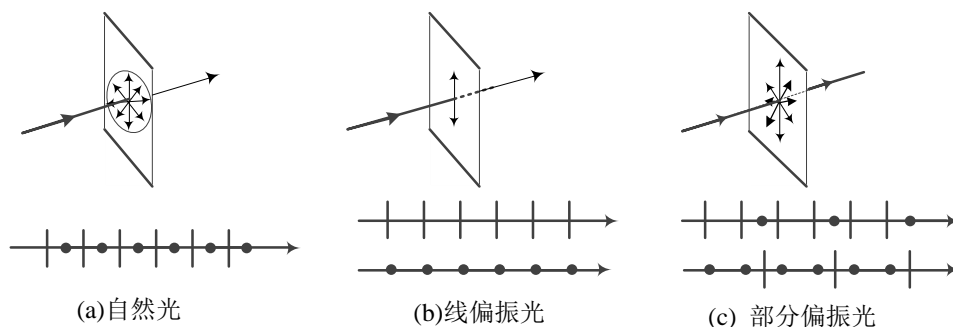


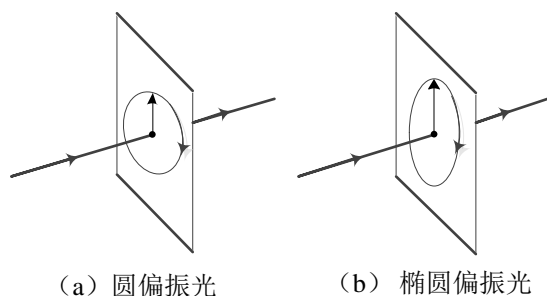
图4.8.2 自然光,线偏振光及部分偏振光的图示

自然光经过折射、反射或吸收后，可能只保留某一方向上的光振动。如果光矢量始终沿某一方向振动，这样的光就称为线偏振光或完全偏振光。光矢量的振动方向和光的传播方向组成的平面称为振动面，由于线偏振光的光矢量始终在该平面内，所以线偏振光又称为平面

偏振光。线偏振光的图示如图 4.8.2 (b) 所示。

如果在与光的传播方向垂直的振动平面内，各个方向的光振动都有，但振幅不同，在某个方向上光振动最强，在与之垂直的方向上光振动最弱，且各个方向的光振动之间没有固定的相位关系，这种光称为部分偏振光，如图 4.8.2 (c) 所示。部分偏振光可以由自然光和线偏振光混合而成。

如果光在传播时，光矢量的振动方向以光线为轴线在不断地旋转，并且在与传播方向垂直的平面内，光矢量的端点所画出的轨迹是一个圆，这样的光称为圆偏振光；如果光矢量的端点画出的轨迹是一个椭圆，这样的光称为椭圆偏振光，如图 4.8.3 所示。



(a) 圆偏振光 (b) 椭圆偏振光

图4.8.3 圆偏振光和椭圆偏振光

根据振动叠加原理可知，当一个质点同时参与两个振动方向互相垂直、频率相同的两个简谐振动时，该质点合运动的轨迹就是一个椭圆。所以椭圆偏振光可以看成是两个光振动面互相垂直的、具有恒定相位差的两束线偏振光叠加而成的，而线偏振光和圆偏振光是椭圆偏振光在一定条件下的特例。

2. 起偏与检偏，马吕斯定律

某些天然或人造材料具有选择性吸收不同振动方向的光的性质（二向色性）。当自然光入射到由这种材料制作的光学元件上时，某个方向上的光振动被完全吸收而消失，只剩下与吸收方向垂直的光振动，于是从该元件透射出来的光就是线偏振光，这样的光学元件称为偏振片。偏振片中允许光振动通过的方向叫做偏振片的偏振化方向。还可利用光的反射和折射、晶体的双折射效应产生线偏振光。

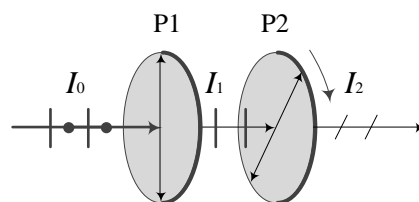


图4.8.4 起偏和检偏

从自然光获得偏振光的过程称为起偏，相应的光学元件称为起偏器，如图 4.8.4 中的偏振片 P1。检验光波是不是线偏振光的过程称为检偏，所用的偏振片称为检偏器，如图 4.8.4 中的偏振片 P2。

1808 年，法国物理学家马吕斯 (E. L. Malus) 发现：在不考虑吸收和发射的条件下，一束强度为 I_1 的线偏振光垂直入射到偏振片上时，从偏振片透射出来的光强 I_2 与 I_1 的关系满足

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta \quad (4.8.1)$$

这称为马吕斯定律。式中 θ 是入射线偏振光的光振动方向与检偏器的偏振化方向之间的夹角。

图 4.8.4 表示自然光通过起偏器和检偏器的变化。当以光线传播方向为轴转动检偏器时，透射光强度 I_2 将发生周期性变化。当 $\theta=0^\circ$ 时，透射光强度最大；当 $\theta=90^\circ$ 时，透射光强度最小（称为消光）；当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时，透射强度 I_2 介于最大值和最小值之间。根据透射光强度变化的情况，可以区别线偏振光、自然光和部分偏振光。

3. 波片，椭圆偏振光

当一束光入射到各向异性的透明晶体表面上时，在晶体内会有两束折射光，这称为双折射现象。在双折射的两束折射光中，遵守折射定律的一束称为寻常光（o 光）；不遵守折射定律的一束称为非常光（e 光）。o 光和 e 光都是线偏振光

实验表明，晶体内有一个特定的方向，当光沿着该特定的方向传播时，不产生双折射现象。这个特定的方向叫做晶体的光轴。只有一个光轴方向的晶体，称为单轴晶体。

波片是光轴与晶体表面平行的单轴晶体薄片。如图 4.8.5 所示，一束平面偏振光垂直入射到波片表面后，便在晶体内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，两者在晶体内的传播方向（同入射光方向）一致，但传播速度和折射率不同，所以经过厚度为 d 的波片后，两者会产生光程差，即

$$\delta = (n_o - n_e)d$$

对应的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d \quad (4.8.2)$$

式中 n_o , n_e 分别为 o 光和 e 光的主折射率， λ 为光波在真空中的波长。若 $\delta_0 = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{4}$ ，即 $\Delta\varphi_0 = \pm(2k+1)\frac{\pi}{2}$ ，对应的波片称为 $\frac{1}{4}$ 波片；若 $\delta_0 = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2}$ ，即 $\Delta\varphi_0 = \pm(2k+1)\pi$ ，则称为 $\frac{1}{2}$ 波片或“半波片”。

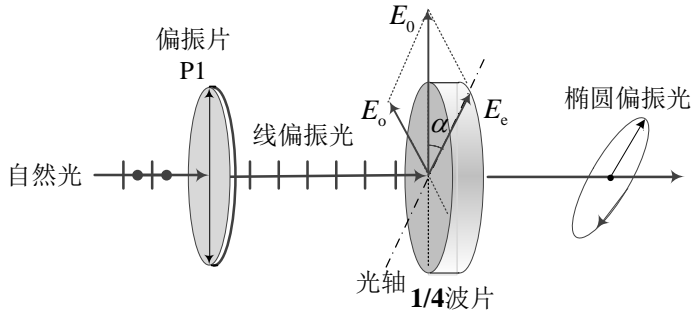


图4.8.5波片与椭圆偏振光

经过波片后 e 光和 o 光时的光振动可分别表示为

$$E_e = A_e \cos \omega t, \quad E_o = A_o \cos(\omega t + \Delta\varphi)$$

这是两个相互垂直的同频率且具有恒定相位差的简谐振动，其合振动的方程为椭圆方程：

$$\frac{E_e^2}{A_e^2} + \frac{E_o^2}{A_o^2} - 2\frac{E_e E_o}{A_e A_o} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi$$

显然，当两振动的相位差 $\Delta\varphi = \pm(2k+1)\frac{\pi}{2}$ 时，合成的是长轴或短轴与光轴重合的正椭圆偏振光，若此时还有 $A_1 = A_2$ ，则合成为圆偏振光；当 $\Delta\varphi = 0$ 或 $k\pi$ 时，椭圆偏振光退化为线偏振光。

如果用极坐标表示椭圆方程，合成矢量 E 和 x 轴夹角为 β ，则方程为

$$E = \sqrt{\frac{A_e^2 A_o^2}{A_e^2 \sin^2 \beta + A_o^2 \cos^2 \beta}} \quad (4.8.3)$$

在垂直于椭圆偏振光的方向上放置检偏器 P2，如图 4.8.6 所示，其偏振化方向与 x 轴夹角为 φ ，则透射光的光强为

$$I = A_x^2 \cos^2 \varphi + A_y^2 \sin^2 \varphi$$

相应的光电流为

$$i(\varphi) = i_x \cos^2 \varphi + i_y \sin^2 \varphi$$

由以上两式可看出

$$E \propto \sqrt{\frac{i_x i_y}{i(\varphi + 90^\circ)}} = \sqrt{\frac{i_x i_y}{i_x + i_y - i(\varphi)}} \quad (4.8.4)$$

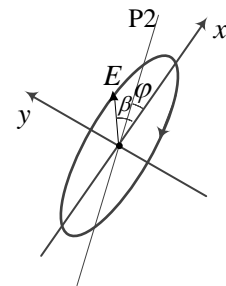


图4.8.6椭圆偏振光与P2

当 P2 的偏振化方向沿椭圆的长短轴时，光强 I 有极值（即光电流有极值 i_x, i_y ）。当 P2 的偏振化方向与 x 轴间有不同夹角 φ 时，可测得光电流 $i(\varphi)$ ，根据式 (4.8.4) 的 E 和角度 φ 可确定出椭圆偏振光的椭圆形状。

【实验内容与步骤】

1. 仪器调整

- (1) 打开激光器电源（激光使用中注意安全，切勿直视激光光束）。
(2) 调节实验中所用各器件，使其中心皆位于同一水平轴上，使光电接收器 D 能够接收到均匀的亮斑。

2. 验证马吕斯定律

- (1) 放置器件 P₁、D 到光路中（图 4.8.1），调节 P₁ 指针到 0°，放置 P₂ 并转动 P₂ 指针直至出现消光（即 P₂ 与 P₁ 的偏振化方向垂直），记下此时的光电流 i_{\perp}

（注：当消光时，理论上应有光电流 $i_{\perp} = 0$ ，但在实际操作中因环境中杂散光的影响 $i_{\perp} \neq 0$ ，故实验中所测光电流皆应减去 i_{\perp} 后再参与计算）。

- (2) 转动 P₂ 指针直至出射光强最大，此时 P₂ 与 P₁ 的偏振化方向之间的夹角 $\theta = 0^\circ$ ，记下此时的光电流，然后，取 $\Delta\theta = 10^\circ$ 调整夹角 θ 直至 $\theta = 180^\circ$ ，依次测量并记录光电流 $i(\theta)$ 到表 4.8.1 中。

3. 测椭圆偏振光

- (1) 当 P₂ 与 P₁ 的偏振化方向垂直时，将 1/4 波片 C 放到 P₁ 和 P₂ 之间，转动波片 C 的指针直至出现消光，记下此时波片指针读数 α_0 （要求 $\alpha_0 \leq 45^\circ$ ），及此时 P₂ 指针读数 p_{20} 和此时光电流值 i_{\perp} 。（注意：此时波片 C 的光轴与 P₁ 的偏振化方向之间的夹角 $\alpha = 0^\circ$ ，即波片光轴方向与 P₁ 的偏振化方向相平行）。

- (2) 使波片 C 的指针顺时针转动 30° 角，即波片光轴方向与 P₁ 的偏振化方向间的夹角为 $\alpha = 30^\circ$ ，波片光轴方向与 P₂ 的偏振化方向间的夹角为 $\varphi = 60^\circ$ ，如图 4.8.7 所示。

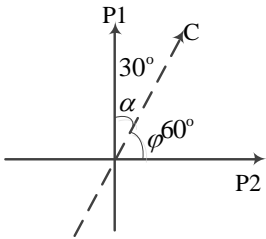


图4.8.7

- (3) 转动 P₂ 的指针一周，测出椭圆长轴处对应的极大光电流值 i_{x1} 和 i_{x2} ；短轴处对应的极小光电流值 i_{y1} 和 i_{y2} 。若满足 $(i_x - i_{\perp}) / (i_y - i_{\perp}) = 2 \sim 4$ ，就可进行第四步。否则，重新从第 1 步开始。

- (4) 调节 P₂ 的指针从 P₂₀ 反时针转 60° （这时 $\varphi = 0^\circ$ ），记下对应的光电流值 $i(0)$ ，此后顺时针转动 P₂ 的指针，每增加 $\Delta\varphi = 10^\circ$ 记录一次光电流 $i(\varphi)$ 到表 4.8.2 中。

【数据记录与处理】

一. 数据记录

表 4.8.1

| $\theta(^{\circ})$ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | ... | 180 |
|-------------------------|---|----|----|----|----|-----|-----|
| $i(\theta)$ | | | | | | | |
| $i(\theta) - i_{\perp}$ | | | | | | | |

表 4.8.2

| $\alpha = 30^\circ \quad i_{\perp} = \quad i_{x1} = \quad i_{x2} = \quad i_{y1} = \quad i_{y2} =$ | | | | | | | |
|---|---|----|----|----|----|-----|-----|
| $\varphi(^{\circ})$ | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | ... | 360 |
| $i(\varphi)$ | | | | | | | |
| E | | | | | | | |

二. 数据处理

1. 所测数据 $i(\theta)$ ， i_x ， i_y ， $i(\varphi)$ 都应减去 i_{\perp} 后再参与运算。

2. 验证马吕斯定律，由表 4.8.1 数据作 $i(\theta) \sim \theta$ 曲线

3. 计算表 4.8.2 中光电流极值的平均值 $i_x = \frac{i_{x1} + i_{x2}}{2}$ ， $i_y = \frac{i_{y1} + i_{y2}}{2}$ ，再由式 (4.8.4)

计算 E ，并填入表 4.8.2。

4. 根据表 4.8.2 中实验数据 φ （极角）， E （极径），在极坐标纸上作出 $E \sim \varphi$ 关系曲线（椭圆图形）。

【预习思考题】

1. 如何利用光的反射、折射获得线偏振光？
2. 波片的作用是什么？1/4波片和1/2波片有什么不同？
3. 怎样才能得到圆偏振光？

【课后习题】

1. 本实验为什么要用单色光源照明？根据什么选择单色光源的波长？若光波波长范围较宽，会给实验带来什么影响？
2. 怎样检测椭圆偏振光的形状？当测出椭圆形状不对称时，试分析其原因。
3. 当偏振片正交放置时，光束不能通过正交偏振片（消光）。若在两偏振片之间加一玻片，光束能否通过？
4. 椭圆偏振光和部分偏振光有什么区别？

实验 液晶光学双稳态特性研究

【实验目的】

- (1) 了解光学双稳态现象
- (2) 利用偏振片调节光强的方法，验证马吕斯定律
- (3) 测量液晶光阀的光电特性
- (4) 观测光学双稳态

【实验原理】

对于一个给定的入射光强。存在两个可能的、稳定的输出光强状态，而且可以用光学的方法实验两个稳态间的翻转，即称该系统具有光学双稳性，其特性曲线如图 1 所示。其中 I_i 为入射光强， I_t 为透射光强。透射光相对于入射光具有延滞特性，因而形成两处稳定状态。在外加光脉冲的作用下，在两态间可能发生开关突变。

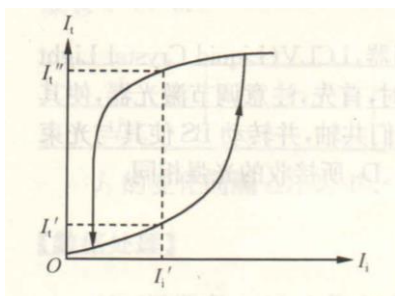


图 1 光学双稳特性曲线

利用物质的光学双稳态现象，可以制作各种各样的光学双稳态器件，特别是作为开关和存储元件，有着重要的应用前景。作为开关元件时，其开关速度在理论上可达 $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{s}$ ，是现有电子开光的 $10^2 \sim 10^3$ 倍，光学双稳态器件与晶体管相比，就是可以进行信号平行处理，光波在真空中传播时，两束光只要分开几个波长的距离即可互不影响，故在同一光学元件中，可以平行地通过几束光波，同一元件的不同区域可以同时分别对各光束进行运算操作。这将对计算机的构造和算法带来一场革命式改变。

具有光学双稳性的光学器件一般是由非线性介质，反馈系统和外界入射光源三个要素组成。按其反馈方式的不同可分为本征型（纯光学型）和混合型（光电混合型）两类，混合型的典型装置由光电调制器、光电探测器和放大器组成，以透射光中取出部分光信号通过探测器转变为电信号，放大后加在调制器上，构成光电混合反馈。

本实验将利用液晶光阀的透光率与加在其上的电压有关这一特性，将出射光转换成电压，经放大后反馈到液晶光阀上，使其在不同的出射光强下具有不同的透光率，即形成两个相互制约的因素：透光率取决于电压，电压取决于透光率，从而实现光学双稳态。

【实验仪器】

本实验有实验控制仪和光学装置构成

实验控制仪（图 2）实际上是一个集成的工作箱。它可提供激光器工作电压、 D_1 和 D_2 探测器所需工作电压、运算放大器（AM）所需工作电压和加在液晶光阀上的偏置电压；它能显示偏置电压的大小以及 D_1 、 D_2 探测的结果，并且在实验控制仪上可以选择是否加载反馈电压，也可对 AM 的反馈电压进行调节

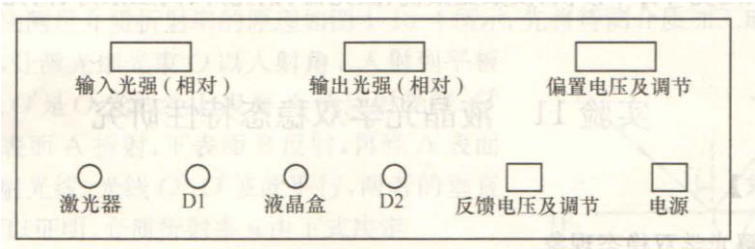


图 2 实验控制仪

光学装置与调试如图 3 所示

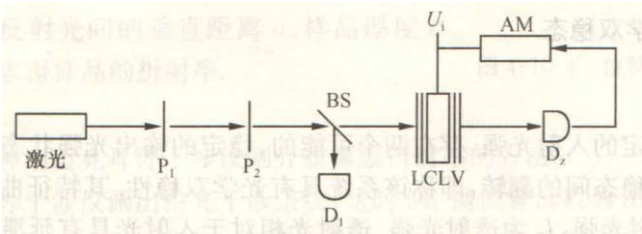


图 3 光学装置图

其中， P_1 、 P_2 为偏振片，BS 为分束器， D_1 、 D_2 为光电探测器，LCLV (liquid crystal light valve) 为液晶光阀，AM 为放大器， U_1 为偏置电压。调节仪器时，首先注意调节激光器，使其发出的光尽可能会聚；其次，调节 P_1 、 P_2 、BS 以及 LCLV 使它们共轴，并转动 BS 使其与光束程 45° ；最后，确定光束是否正确入射光电探测器。总之，确保 D_1 、 D_2 所接收的光强相同。

【实验内容】

1. 验证马吕斯定律

实验中利用一对偏振片 P_1 、 P_2 组成光强调制器，根据马吕斯定律，只要调节两偏振片间夹角就可以改变输入光强：

$$I_t = I_i \cos^2 \theta \quad (1)$$

移去光路中的分光器和液晶光阀，使光强调制器的起偏器 P_1 与检偏器 P_2 的游标对准零线。

调整光路，使电表**不溢出**的情况下显示尽可能大（注意：激光器输出的为偏振光， D_2 探测器的显示光强值在 100 多就达饱和，因此，需要同时调节 P_1 和 P_2 的偏振方向，使 D_2 探测器显示的数值尽可能的大，但又不达饱和），改变检偏器 P_2 的方向，测量在不同方向时，光电三级光接收到的光强，完成表 1。

表 1

| P_2 方位 θ | 0° | 10° | 20° | ... | 180° |
|-------------------|-----------|------------|------------|-----|-------------|
| 输出光强 I_t | | | | | |

2. 测量液晶光阀的电光特性

液晶（liquid crystal）是指在一定温度范围内，从外观看属于具有流动性的液体，同时又具有光学晶体特性（如双折射）的一种物质，即液体晶体的简称。液晶分子多数呈长条形，长度为宽度的 4~8 倍，具有较强的电偶极矩。由于分子间作用力比固体弱，利用微小的外部能量——电场、磁场等就能实现各分子状态的转变，从而拥有独特的电磁、光学特性。

本实验中，当 **LCLV** 上不加电压的时候，液晶处于高透光状态；当电极上加入一定的电压时，处在低透光状态。本仪器正是利用这一特性来实验光学双稳态的。
按图 3 调好光路， P_1 与 P_2 偏振方向平行，保持 LCLV 的输入光强度不变，不加反馈，调节偏置电压 U_i ，测量在不同偏置电压下的出射光强，完成表 2

表 2

| U_i | 0 | 0.5 | ... | 6.0 | 6.2 | 6.4 | ... | 10.0 | 10.1 | ... | 11.5 |
|-------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|------|
| I_t | | | | | | | | | | | |

3. 观测光学双稳态

- （1）调节偏置电压至恰当值，不加反馈
应使所选电压处在 LCLV 透射率变化最大的时候，可根据表 2 观察，本实验中为 8~9V，此时 LCLV 处在低透射率状态，即输出光强较小。
- （2）按下反馈开关，调节反馈放大倍数合适，使加反馈后输出光强由低跳高，其跳高数值可由表 2 作参考，注意放大倍数，太大、太小均不益于双稳态现象的观察。
- （3）通过改变偏振片 P_1 的方向来改变 LCLV 的入射光强，使输入光强从大到小，同时测量输入光强的变化，再反向调节 P_1 时输入光强从小到大，测量输出光强的变化，完成表 3。

表 3

| I_i | I_{\max} | ... | I_{\min} | ... | I_{\max} |
|-------|------------|-----|------------|-----|------------|
| I_t | | | | | |

注意： I_i 的变化间隔为 10

【数据处理】

- （1）根据表 1 做出 I_t - θ 曲线
- （2）根据表 2 做出 I_t - U_i 曲线
- （3）根据表 3 做出 I_t - I_i 迟滞回线图

注意：验证马吕斯定律是调节 P_2 ，观测双稳态现象时调节 P_1

【思考题】

根据表 3，指出一例同一入射光强下可能有两种稳定的输出的光强值。