

大学物理实验

第一册

上海交通大学物理实验中心

2005年1月

目 录

“大学物理实验”（基本部分）实验内容·····	1
“大学物理实验”上课须知·····	2
第一章 测量、误差和数据处理 ·····	4
1 测量与误差·····	4
2 测量的不确定度和测量结果的表示·····	6
3 有效数字及其运算规则·····	12
4 实验数据处理与作图要求·····	14
练习题·····	18
第二章 基本实验 ·····	21
实验 一 声速的测量·····	21
实验 二 简谐振动的研究·····	26
实验 三 直流电桥与电阻测量·····	29
实验 四 集成霍尔传感器的特性测量及应用·····	33
实验 五 用纵向磁聚焦法测定电子荷质比·····	37
实验 六 太阳电池伏-安特性的测量·····	44
实验 七 电阻应变片传感器灵敏度的测量·····	48
实验 八 光学测角仪的调整与使用·····	54
实验 九 静物全息照片的摄制与观察·····	64
实验 十 光衍射相对光强分布的测量·····	69
实验十一 落球法测液体粘滞系数·····	74
实验十二 连续信号瞬态信号的测量·····	78
实验十三 光敏电阻基本特性的测量·····	83
实验十四 用 CCD 成像系统观测牛顿环·····	86
实验十五 非线性元件伏安特性的测量·····	90

附录	93
Origin 在物理实验中的应用	93
附表	101
附表 1 常用物理量常数	101
附表 2 液体的粘滞系数	101
附表 3 20℃时常用固体和液体的密度	102
附表 4 标准大气压下不同温度的水的密度	102
附表 5 水的沸点(℃)随压强 $P(\text{mmHg})$ 的变化表	103
附表 6 海平面上不同纬度处的重力加速度	103
附表 7 某些金属和合金的电阻率及其温度系数	103
附表 8 不同金属或合金与铂(化学纯)构成热电偶时的热(温差电动势(热端在 100℃,冷端在 0℃时))	104
附表 9 标准化热电偶	104
附表 10 20℃时常用金属的杨氏弹性模量	105
附表 11 固体的线膨胀系数	105
附表 12 常用光谱灯和激光器的可见谱线波长	106
附表 13 某些物质的折射率	107
附表 14 某些物质中的声速	108
附表 15 不同温度下干燥空气中的声速	108

实验六 太阳能电池伏-安特性的测量

太阳能电池(Solar Cells),也称为光伏电池,是将太阳光辐射能直接转换为电能的器件.由这种器件封装成太阳能电池组件,再按需要将一块以上的组件组合成一定功率的太阳能电池方阵,经与储能装置、测量控制装置及直流-交流变换装置等相配套,即构成太阳能电池发电系统,也称为之光伏发电系统.它具有不消耗常规能源、无转动部件、寿命长、维护简单、使用方便、功率大小可任意组合、无噪音、无污染等优点.世界上第一块实用型半导体太阳能电池是美国贝尔实验室于1954年研制的.经过人们40多年的努力,太阳能电池的研究、开发与产业化已取得巨大进步.目前,太阳能电池已成为空间卫星的基本电源和地面无电、少电地区及某些特殊领域(通信设备、气象台站、航标灯等)的重要电源.随着太阳能电池制造成本的不断降低,太阳能光伏发电将逐步地部分替代常规发电.近年来,在美国和日本等发达国家,太阳能光伏发电已进入城市电网.从地球上化石燃料资源的渐趋耗竭和大量使用化石燃料必将使人类生态环境污染日趋严重的战略观点出发,世界各国特别是发达国家对于太阳能光伏发电技术十分重视,将其摆在可再生能源开发利用的首位.因此,太阳能光伏发电有望成为21世纪的重要新能源.有专家预言,在21世纪中叶,太阳能光伏发电将占世界总发电量的15%~20%,成为人类的基础能源之一,在世界能源构成中占有一定的地位.

【实验目的】

1. 了解太阳能电池的工作原理及其应用;
2. 测量太阳能电池的伏-安特性曲线.

【实验原理】

1. 太阳能电池的结构

以晶体硅太阳能电池为例,其结构示意图如图1所示.晶体硅太阳能电池以硅半导体材料制成大面积pn结进行工作.一般采用 n^+p 同质结的结构,即在约 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 面积的p型硅片(厚度约 $500\text{ }\mu\text{m}$)上用扩散法制作出一层很薄(厚度 $\sim 0.3\text{ }\mu\text{m}$)的经过重掺杂的n型层.然后在n型层上面制作金属栅线,作为正面接触电极.在整个背面也制作金属膜,作为背面欧姆接触电极.这样就形成了晶体硅太阳能电池.为了减少光的反射损失,一般在整个表面上再覆盖一层减反射膜.

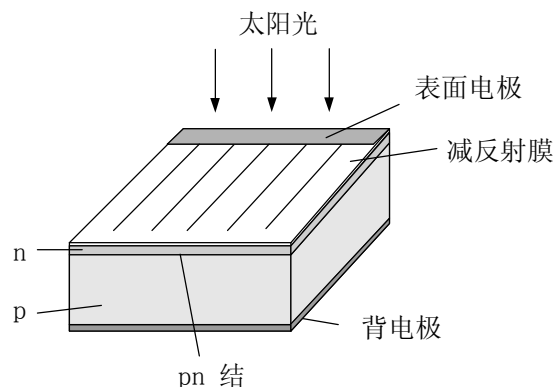


图1 晶体硅太阳能电池的结构示意图

2. 光伏效应

当光照射在距太阳能电池表面很近的pn结时,只要入射光子的能量大于半导体材料的禁

带宽度 E_g ，则在 p 区、n 区和结区光子被吸收会产生电子-空穴对。那些在结附近 n 区中产生的少数载流子由于存在浓度梯度而要扩散。只要少数载流子离 pn 结的距离小于它的扩散长度，总有一定几率扩散到结界面处。在 p 区与 n 区交界面的两侧即结区，存在一空间电荷区，也称为耗尽区。在耗尽区中，正负电荷间形成一电场，电场方向由 n 区指向 p 区，这个电场称为内建电场。这些扩散到结界面处的少数载流子（空穴）在内建电场的作用下被拉向 p 区。同样，如果在结附近 p 区中产生的少数载流子（电子）扩散到结界面处，也会被内建电场迅速被拉向 n 区。结区内产生的电子-空穴对在内建电场的作用下分别移向 n 区和 p 区。如果外电路处于开路状态，那么这些光生电子和空穴积累在 pn 结附近，使 p 区获得附加正电荷，n 区获得附加负电荷，这样在 pn 结上产生一个光生电动势。这一现象称为**光伏效应**（Photovoltaic Effect, 缩写为 PV）。

3. 太阳能电池的表征参数

太阳能电池的工作原理是基于光伏效应。当光照射太阳能电池时，将产生一个由 n 区到 p 区的**光生电流** I_{ph} 。同时，由于 pn 结二极管的特性，存在正向二极管电流 I_D ，此电流方向从 p 区到 n 区，与光生电流相反。因此，实际获得的电流 I 为

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中 V_D 为结电压， I_0 为二极管的反向饱和电流， I_{ph} 为与入射光的强度成正比的光生电流，其比例系数是由太阳能电池的结构和材料的特性决定的。 n 称为理想系数（ n 值），是表示 pn 结特性的参数，通常在 1~2 之间。 q 为电子电荷， k_B 为波尔茨曼常数， T 为温度。

如果忽略太阳能电池的串联电阻 R_s ， V_D 即为太阳能电池的端电压 V ，则（1）式可写为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

当太阳能电池的输出端短路时， $V=0$ ($V_D \approx 0$)，由（2）式可得到**短路电流**

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (3)$$

即太阳能电池的短路电流等于光生电流，与入射光的强度成正比。当太阳能电池的输出端开路时， $I=0$ ，由（2）和（3）式可得到**开路电压**

$$V_{oc} = \frac{nk_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (4)$$

当太阳电池接上负载 R 时, 所得的负载伏-安特性曲线如图 2 所示. 负载 R 可以从零到无穷大. 当负载 R_m 使太阳电池的功率输出为最大时, 它对应的**最大功率** P_m 为

$$P_m = I_m V_m \quad (5)$$

式中 I_m 和 V_m 分别为**最佳工作电流**和**最佳工作电压**. 将 V_{oc} 与 I_{sc} 的乘积与最大功率 P_m 之比定义为**填充因子** FF , 则

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (6)$$

FF 为太阳电池的重要表征参数, FF 愈大则输出的功率愈高. FF 取决于入射光强、材料的禁带宽度、理想系数、串联电阻和并联电阻等.

太阳电池的**转换效率** η 定义为太阳电池的最大输出功率与照射到太阳电池的总辐射能 P_{in} 之比, 即

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\% \quad (7)$$

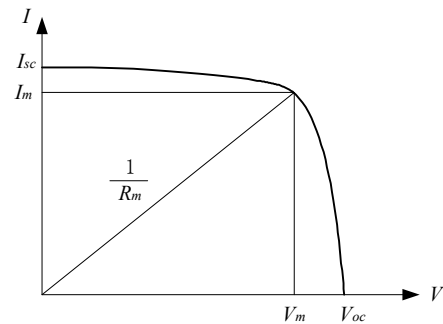


图 2 太阳电池的伏-安特性曲线

4. 太阳电池的等效电路

太阳电池可用 pn 结二极管 D 、恒流源 I_{ph} 、太阳电池的电极等引起的串联电阻 R_s 和相当于 pn 结泄漏电流的并联电阻 R_{sh} 组成的电路来表示, 如图 3 所示, 该电路为太阳电池的等效电路. 由等效电路图可以得出太阳电池两端的电流和电压的关系为

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + R_s I)}{nk_B T} \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (8)$$

为了使太阳电池输出更大的功率, 必须尽量减小串联电阻 R_s , 增大并联电阻 R_{sh} .

【实验仪器】

1. 太阳能光伏组件, 功率为 5 瓦.
2. 辐射光源, 300 瓦卤钨灯.
3. 数字万用表, 2 个.
4. 可变电阻 2 个, 接线板.

【实验内容】

1. 将太阳能光伏组件，数字万用表，负载电阻通过接线板连接成回路，改变负载电阻 R ，测量流经负载的电流 I 和负载上的电压 V ，即可得到该光伏组件的伏-安特性曲线。测量过程中辐射光源与光伏组件的距离要保持不变，以保证整个测量过程是在相同光照强度下进行的。

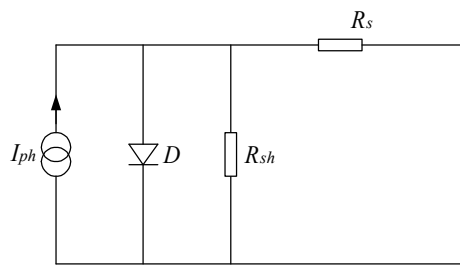


图3 太阳电池的等效电路

2. 分别测量以下几种条件下光伏组件的伏-安特性曲线：

- (1) 辐射光源与光伏组件地距离为 60 cm；
- (2) 辐射光源与光伏组件地距离为 80 cm；
- (3) 辐射光源与光伏组件地距离为 80 cm，将两组光伏组件串联；
- (4) 辐射光源与光伏组件地距离为 80 cm；，将两组光伏组件并联。

3. 用坐标纸或计算机绘图软件画出不同条件下：

- (1) 光伏组件的伏-安特性曲线；
- (2) 光伏组件的输出功率 P 随负载电压 V 的变化；
- (3) 光伏组件的输出功率 P 随负载电阻 R 的变化。确定不同条件下光伏组件的短路电流 I_{sc} ，开路电压 V_{oc} ，最大功率 P_m ，最佳工作电流 I_m 、工作电压 V_m 及负载电阻 R_m ，填充因子 FF ，并将这些实验数据列在一表格内进行比较。

【注意事项】

1. 辐射光源的温度较高，应避免与灯罩接触。
2. 辐射光源的供电电压为 220V，应小心触电。

实验十二 连续信号和瞬态信号的测量

在信号测量中，常用的方法是将被测物理量通过传感器转换成电信号再测量，在这些信号中有很多是随时间变化的，对于这类信号，用示波器测量是比较合适的。

示波器是一种常用的电子仪器，用于观察和测量电信号，由于电子的惯性很小，因此示波器可以在很宽的频率范围内工作。

示波器的种类很多，随着数字技术的发展，数字存储示波器的使用越来越广泛，它能把观测信号存储起来，在信号消失后仍能使原信号重现，在观测单次信号（诸如爆炸、冲击、闪光等瞬态过程）、低频脉冲信号或与以前观察的波形进行比较时，选用具有存储功能的示波器是合适的，它可以代替一般的摄影技术来记录波形。

示波器的具体电路比较复杂，需要具备一定的电子学知识，不在本实验的讨论范围，本实验仅限于学习示波器的基本使用方法。

【实验目的】

1. 学习数字存储示波器的基本使用；
2. 利用数字存储示波器观察和测量连续电信号；
3. 利用数字存储示波器观察和测量闪光灯瞬态信号。

【实验仪器】

TDS210 数字存储示波器，DF1631 功率函数信号发生器，闪光发生器，数字万用表和光电传感器及配套元件等

【实验内容】

1. 观察和测量连续信号的参数

测量信号发生器输出的交流波形，波形有：正弦波、方波，脉冲波和 TTL 电平的波形。分别用示波器的交直流输入档测量。粗略描绘波形，记录其峰-峰值、周期或频率。

2. 相位差的测量

按图 1 连接 RC 移相电路，利用示波器的光标（**CURSOR**）旋钮测出输入信号电压和电容两端电压之间的相位差图 2 所示，寻找 3 个频率，分别使得相位差接近 0 度、等于 45 度和接近 90 度。画出矢量图（图 3 所示的任意相位差的矢量图）。

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta T}{T}$$

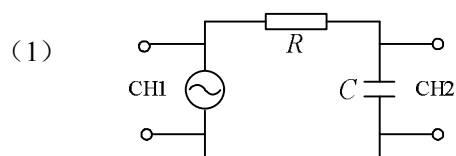


图 1 RC 移相电路

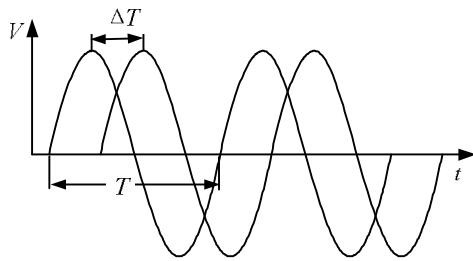


图2 经过移相电路的两列正弦波

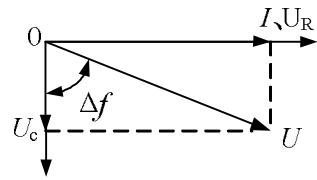


图3 U_C 、 U_R 矢量图

3. 瞬态信号的测量

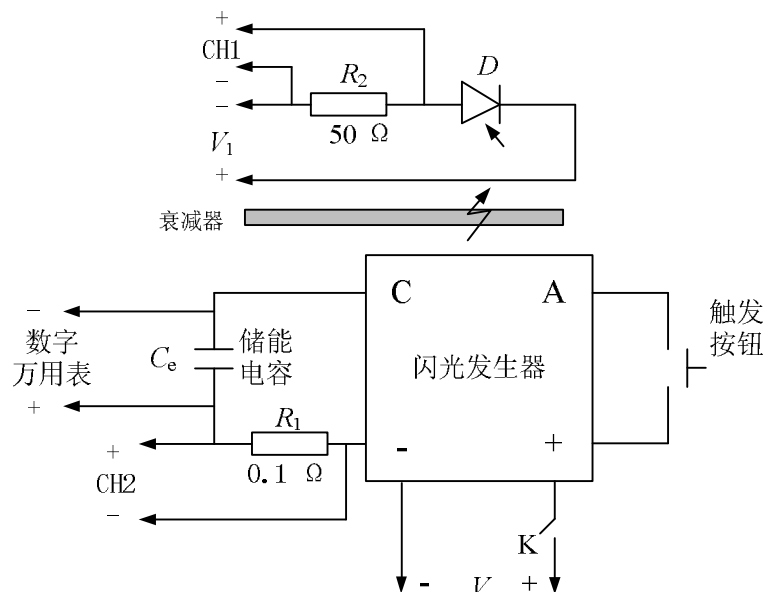


图4 瞬态信号测量接线图

参见图4，闪光灯属气体放电灯，内充有高压氙气，在两端加有高压的情况下，气体迅速电离，形成电弧，此时电阻急剧下降，在灯管中流过很大的电流，储能电容用来维持放电状态初始的电离，由外加的一个高压脉冲引起。由于在放电过程中，储能电容的能量迅速下降，电容两端的电压也迅速下降，当放电过程不能维持时，闪光就终止了。如果储能电容的容量较小时，这个过程非常短，在微秒量级，要观察其放电过程，较好的方法是用存储示波器。

对于极短的闪光过程，要选用合适的光电传感器，响应时间要短。这里我们给出了两种光电传感器，一种是较小面积的PIN型硅光电二极管，这种二极管在PN结中间夹了一层本征材料层，在反向偏置使用时有更小的电容更快的响应和更好的线性。它的有光照变化下的伏-安特性曲线见图5。

同时我们给出另一种CdS光敏电阻。CdS光敏电阻的响应时间比较长，不适应作快速测量，在这里我们给出是为了作一个比较，在快速测量中取样电阻也要小，以减少高频损

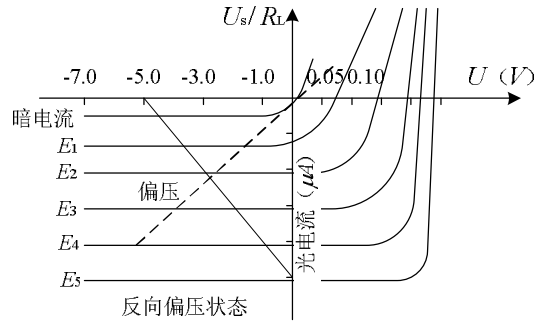


图5 有光照条件下结型硅光电二极管的伏-安特性曲线

失.

图4中 C_e 为储能电容, R_1 为放电时的电流取样电阻, R_2 为光电传感器 D 的光电流取样电阻, C_e 与闪光灯并联用这个电路, 我们可以同时测量出闪光信号和储能电容 C_e 的放电电流

如果 C_e 两端的电压在放电前后分别为 $V_{充}$ 、 $V_{放}$, 那么 C_e 输出的总能量为

$$E_c = \frac{1}{2} C_e (V_{充}^2 - V_{放}^2) \quad (2)$$

我们还可以估算闪光灯输入的电功率 P_F , 可以将光电流波形的半宽度为时间间隔, 闪光灯输出的光功率取决于闪光灯的转换效率.

通过取样电阻 R_1 , 我们能测量出 C_e 放电的峰值电流 I_p , 从而取样电阻 R_1 的峰值功率 P_{R1} 为

$$P_{R1} = I_p^2 R_1 \quad (3)$$

以信号峰值的 10% ~ 90% 变化量作为基准, 可计算出电流的上升速率 di/dt .

按图4在插件板上连线, 检查无误后接通电源, 当闪光发生器上的指示灯亮后, 按下触发按钮, 此时应有闪光发出. 然后调整示波器的触发模式, 使其处于单次触发状态, 适当调节触发电平和通道灵敏度, 就能在荧屏上看到两个取样波形, 如图6所示;

更换光电传感器, 比较两者的差别;

用两个储能电容, 以串联、单个和并联的方式改变 C_e 的容量, 测量它们的波形, 并计算 E_c , P_{R1} 和 di/dt ;

为了能正确测量 C_e 放电的剩余电压, 在接触发按钮前, 应把电源开关 K 断开. 在更换储能电容时不要碰电容的电极, 要确保电容已经放电.

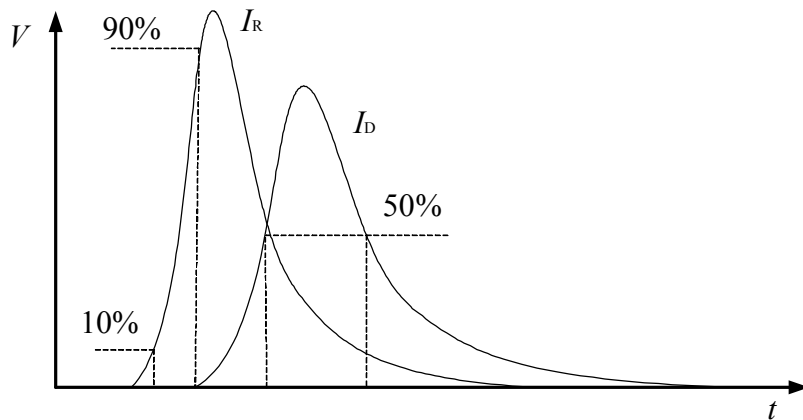


图6 两个取样电阻上信号波形

为了保证硅光电二极管 D 始终保持反向偏置，要适当调整 D 与闪光灯的位置，使 D 上的最低电压在 3V 左右。

【注意事项】

1. 示波器上所有开关及按钮在调节时要用力度适中。
2. 在拔插连接线和元件时，要垂直用力，速度不要过快，以免造成损坏。
3. 更换电容时，必须对电容进行放电，以免遭到电击。

【思考题】

1. 分析实验内容 2 中引起相位差的原因。
2. 在上述瞬态信号测量中，取样电阻 R_1 消耗的能量占储能电容输出总能量的多少？如果 R_1 的阻值增大，放电曲线会有什么变化？
3. 如果在 R_1 上串一个 $1\ \mu\text{H}$ 的电感 L ，请问曲线会有什么变化？如果 di/dt 不变的话，会在 L 上感应出多大的电压？
4. 瞬态信号测量中，我们注意到观测的两个波形起点不一致，光电流波形要滞后于放电电流波形，试提出自己对这一现象的解释。

【附录】

示波器的介绍

面板分为几个功能区，有这个概念后，使用和寻找都很方便。下面概要介绍本实验所需使用的控制钮以及屏幕上显示的信息。（附图 1）

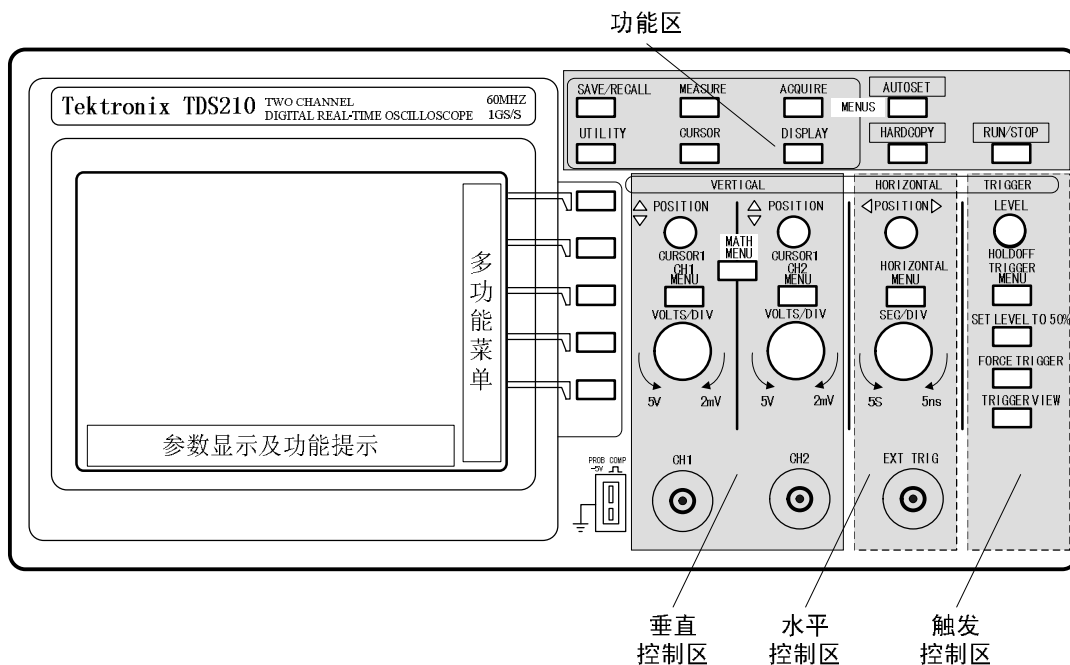
1. 显示区

显示图象中除了波形外，还包含许多有关波形和仪器控制设定值的细节。

2. VERTICAL: 垂直控制区

(1) CH 1

波形输入、放大倍数调整、垂直位置调整、屏幕菜单



附图 1 示波器面板图

(2) CH 2

同上

3. HORIZONTAL: 水平控制区

波形输入、扫描速度、水平位置调整、屏幕菜单

4. TRIGGER: 触发控制区

触发电平调整、触发菜单、触发模式常用键

5. 功能区

(1) SAVE/RECALL: 储存/调出菜单

可储存或调出波形

(2) MEASURE: 测量菜单

使多功能键进入测量模式

(3) ACQUIRE: 采样方式菜单

显示点采样方式选择

(4) CURSOR: 光标菜单

屏幕读出功能，垂直区的两个位置旋钮分别控制两个光标。

(5) DISPLAY: 显示模式菜单

(6) OUTOSET: 自动最佳参数设置

由仪器根据输入波形自动设置扫描参数，适用于多数测量情况。

(7) RUN/STOP: 启动/停止键

扫描启动、停止键。

实验十四 用 CCD 成像系统观测牛顿环

“牛顿环”是一种分振幅等厚干涉现象，是光的波动性的一种表现。“牛顿环”在光学加工中有广泛的应用，例如，利用它可精确地检验光学元件表面的质量，并测试压力与形变的关系等。

CCD (Charge-Coupled Device, 电荷耦合器件) 在图象传感和非接触测量领域发展迅速。用 CCD 观测牛顿环，具有直观，精确度高，图象可保存等优点。

【实验目的】

1. 在进一步熟悉光路调整的基础上，用透射光观察等厚干涉现象——牛顿环；
2. 学习利用干涉现象测量平凸透镜的曲率半径。

【实验原理】

牛顿环仪是由一块曲率半径较大的平凸透镜放在光学平玻璃上构成，平玻璃表面与凸透镜球面之间形成一楔形的空气间隙。当用平行光照射牛顿环仪时，在球面与平玻璃接触点周围就形成了同心圆干涉环——牛顿环。我们可以用透射光来观察这些干涉环，由于空气隙的边界表面是弯曲的，干涉环之间的间距是不等的。

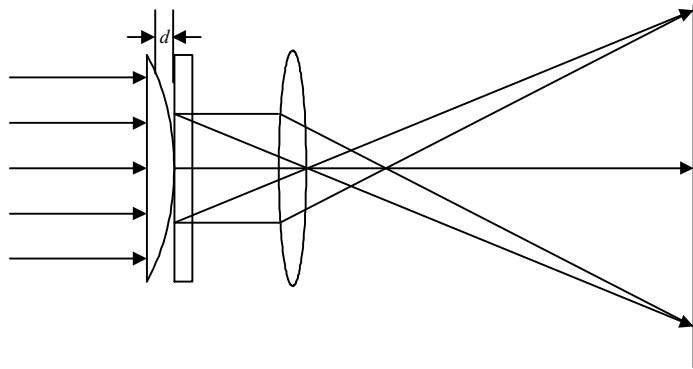


图 1 透射式牛顿环原理图

在图 2 中，一束光 L 从左面照在距离为 d 的空气楔处。部分光 T_1 在气楔的左面边界反射回去。部分光 T_2 通过气楔。在气楔的右面边界有部分光 T_3 反射回来，由于此处是从折射率大的平玻璃面反射，所以包含一个相位变化。部分光 T_4 先从气楔右边界反射回来，然后又从气楔的左面边界反射回来，每一次反射均有一个相位变化（即半波损失）。图 2 表示两束光 T_2 和 T_4 形成透射干涉的原理。 T_2 和 T_4 的光程差 Δ 为

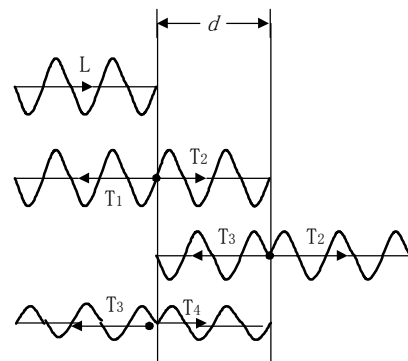


图 2 光通过空气楔干涉的图介

$$\Delta = 2d + 2 \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

形成亮纹的条件: $\Delta = n \cdot \lambda$ ($n = 1, 2, 3, \dots$ 表示干涉条纹的级数), 即

$$d = (n-1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

当二块玻璃相接触时 $d = 0$, 中心形成亮纹.

对于由平凸透镜和平玻璃所形成的气楔, 气楔的厚度取决于离平凸透镜与平玻璃接触点的距离. 换言之, 取决于凸透镜的弯曲半径. 图 3 说明了这样的关系.

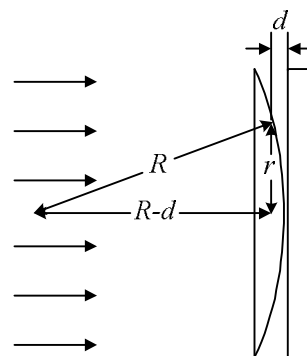


图 3 平凸透镜与平玻璃之间气楔的图介

$$R^2 = r^2 + (R-d)^2$$

$$d = \frac{r^2}{2R} \quad (d \ll R) \quad (3)$$

对于小的厚度 d , 干涉环即牛顿环的半径可以用下式来计算

$$r_n^2 = (n-1) \cdot R \cdot \lambda \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

当平凸透镜与平玻璃的接触点受到轻压时, 我们必须相应修正公式 (3), 近似公式为

$$d = \frac{r^2}{2R} - d_0 \quad r \geq \sqrt{2R \cdot d_0} \quad (5)$$

对于亮环 r_n 的关系如下

$$r_n^2 = (n-1) \cdot R \cdot \lambda + 2R \cdot d_0 \quad n = 2, 3, 4 \dots \quad (6)$$

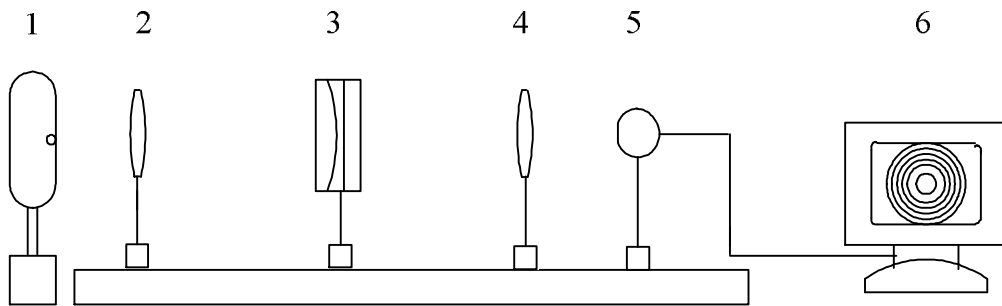
【实验仪器】

钠灯 (中心波长 589.3 nm)、牛顿环、透镜 ($f = 85$ mm)、光屏、定标狭缝板、CCD 摄像头 (35 万像素) 和计算机系统等.

【实验内容】

1. 调整光路, 观察透射式牛顿环

- (1) 按图 4 布置各元件及装置。
- (2) 按同轴等高调整各光学元件. 将各元件靠拢, 调整各元件中心等高在一条直线上, 并使各元件光学平面互相平行.
- (3) 调整钠灯的位置, 使之处于透镜的焦点上, 并用光屏观察透镜后的光斑, 直至移动光屏, 光斑大小不再变化, 此时从透镜出射的平行光均匀照亮牛顿环.
- (4) 调整透镜, 使牛顿环处于透镜的两倍焦距以外, 移动 CCD 摄像头的位置, 直至显示器上呈现大小适中, 清晰的牛顿环, 此时中央环是亮斑.



1. 钠灯; 2. 透镜; 3. 牛顿环; 4. 透镜; 5. CCD; 6. 计算机系统

图 4 实验装置示意图

2. 用钠灯来测量平凸透镜的曲率半径 R :

(1) 用计算机读取牛顿环亮环从第 2 环至 11 环的数据 (具体操作参阅实验室提供的参考资料).

(2) 记录牛顿环、透镜与摄像头在导轨上的位置.

3. 定标

计算机屏上显示的 r'_n 是 CCD 摄像头中牛顿环像的半径, 它是以像元为单位, 必须将 r'_n 换算成 mm 单位. 因此, 须通过定标求出 1 mm 所对应的像元数.

(1) 将图 4 中的牛顿环换成定标狭缝板, 调节透镜与 CCD 的位置, 直至在显示器上呈现清晰的狭缝像.

(2) 用计算机读取狭缝像宽度所对应的像元数 x (具体操作参见实验室提供的参考资料). 根据成像放大率公式, 狭缝像的宽度 $L' = (v/u)L$ (mm), 其中 u 为狭缝的物距, v 为狭缝的像距, L 为狭缝的宽度. 因此, 1 mm 所对应的像元数为 x/L' . 如上所述, 读取三组数据, 计算 1 mm 所对应的像元数的平均值.

【数据处理】

通过定标求出的 1 mm 所对应的像元数, 将 r'_n 换算成 mm 单位, 根据透镜成像公式, 由已知像的半径分别算出牛顿环对应的半径 r_n .

利用所得数据作 r_n^2 与 n 关系图, 并求斜率 α (用最小二乘法验证)、平凸透镜的曲率半径 R 和 d_0 .

【思考题】

1. 对于同一牛顿环装置，反射式干涉环与透射式干涉环有什么异同之处？
2. 公式 $d = \frac{r^2}{2R} - d_0$ 中 d_0 表示什么意义？
3. 当用白光照射时，牛顿环的反射条纹与单色光照射时有何不同？