

大学物理实验

第二册

上海交通大学物理实验中心

2005年6月

目 录

	“大学物理实验”第二学期选课须知·····	I
	实验内容及安排·····	II
实 验 一	<i>RLC</i> 电路特性的研究·····	1
实 验 二	传感器系列实验·····	10
实 验 三	温度传感器特性的研究·····	16
实 验 四	真空获得与真空镀膜·····	22
实 验 五	夫兰克-赫兹实验中弱电流的测量·····	31
实 验 六	全息干涉技术·····	37
实 验 七	非平衡电桥的应用·····	41
实 验 八	光栅特性的研究·····	44
实 验 九	硅光电池特性的研究·····	47
实 验 十	迈克尔逊干涉仪的调整与应用·····	51
实验十一	磁性材料基本特性的研究·····	56
实验十二	用快速电子验证相对论效应·····	61
实验十三	物体色度值的测量·····	68
实验十四	扫描隧道显微镜 (STM) ·····	76
实验十五	用光学多通道分析器研究发光二极管光谱·····	80
实验十六	高温超导材料特性测量·····	85

实验十一 磁性材料基本特性的研究

磁性材料在电力、通讯、电子仪器、汽车、计算机和信息存储等领域有着十分广泛的应用。磁滞回线和居里温度是表征磁性材料的两个基本特性。磁滞回线反映磁性材料在外磁场中的磁化特性，而居里温度则是磁性材料由铁磁性转变为顺磁性的相变温度。

本实验通过对软磁铁氧体材料居里温度及动态磁滞回线的测量，加深对这一磁性材料基本特性的理解。

【实验目的】

1. 了解磁性材料的磁滞回线和磁化曲线概念，加深对铁磁材料的主要物理量矫顽磁力、剩磁和磁导率的理解；
2. 利用示波器观察并测量磁化曲线与磁滞回线；
3. 测定所给定的铁磁材料的居里温度。

【实验原理】

1. 磁化性质

一切可被磁化的物质叫作磁介质。磁介质的磁化规律可用磁感应强度 B 、磁化强度 M 、磁场强度 H 来描述，它们满足以下关系

$$B = \mu_0(H + M) = (\chi_m + 1)\mu_0 H = \mu_r \mu_0 H = \mu H \quad (1)$$

式中， $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率， χ_m 为磁化率， $\mu_r = \chi_m + 1 = B/\mu_0 H$ 为相对磁导率，是一个无量纲的系数。 $\mu = \mu_r \mu_0$ 为绝对磁导率。对于顺磁性介质，磁化率 $\chi_m > 0$ ， μ_r 略大于 1；对于抗磁性介质， $\chi_m < 0$ ，一般 χ_m 的绝对值在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 之间， μ_r 略小于 1；而铁磁性介质的 $\chi_m \gg 1$ ，所以， $\mu_r \gg 1$ 。

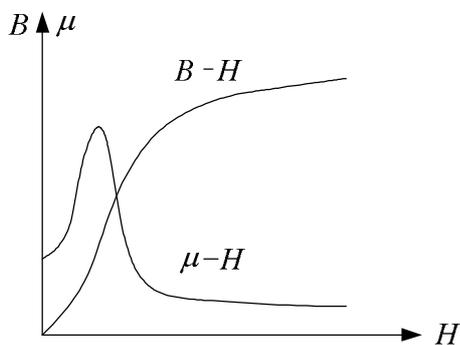


图1 磁化曲线和 $\mu \sim H$ 曲线

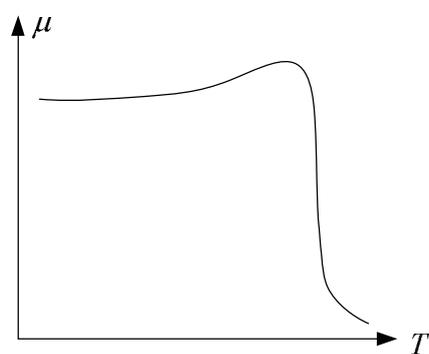


图2 $\mu \sim T$ 曲线

对非铁磁性的各向同性的磁介质, H 和 B 之间满足线性关系, $B = \mu H$, 而铁磁性介质的 μ 、 B 与 H 之间有着复杂的非线性关系. 一般情况下, 铁磁质内部存在自发的磁化强度, 当温度越低自发磁化强度越大. 图 1 是典型的磁化曲线 (B - H 曲线), 它反映了铁磁质的共同磁化特点: 随着 H 的增加, 开始时 B 缓慢的增加, 此时 μ 较小; 而后便随 H 的增加 B 急剧增大, μ 也迅速增加; 最后随 H 增加, B 趋向于饱和, 而此时的 μ 值在到达最大值后又急剧减小. 图 1 表明了磁导率 μ 是磁场 H 的函数. 从图 2 中可看到, 磁导率 μ 还是温度的函数, 当温度升高到某个值时, 铁磁质由铁磁状态转变成顺磁状态, 在曲线上变化率最大的点所对应的温度就是居里温度 T_C .

2. 磁滞性质

铁磁材料除了具有高的磁导率外, 另一重要的特性是磁滞现象. 当铁磁材料磁化时, 磁感应强度 B 不仅与当时的磁场强度 H 有关, 而且与磁化的历史有关, 如图 3 所示. 曲线 OA 表示铁磁材料从没有磁性开始磁化, B 随 H 的增加而增加, 称为磁化曲线. 当 H 值到达某一个值 H_S 时, B 值几乎不再增加, 磁化趋于饱和. 如使得 H 减少, B 将不再沿着原路返回, 而是沿另一条曲线 ACA' 下降, 当 H 从 $-H_S$ 增加时, B 将沿着 $A'CA$ 曲线到达 A 形成一闭合曲线. 其中当 $H=0$ 时, $|B|=B_r$, B_r 称为剩余磁感应强度. 要使得 B_r 为零, 就必须加一反向磁场, 当反向磁场强度增加到 $H = -H_C$ 时, 磁感应强度 B 为零, 达到退磁, H_C 称为矫顽力. 各种铁磁材料有不同的磁滞回线, 主要区别在于矫顽力的大小, 矫顽力大的称为硬磁材料, 矫顽力小的称为软磁材料.

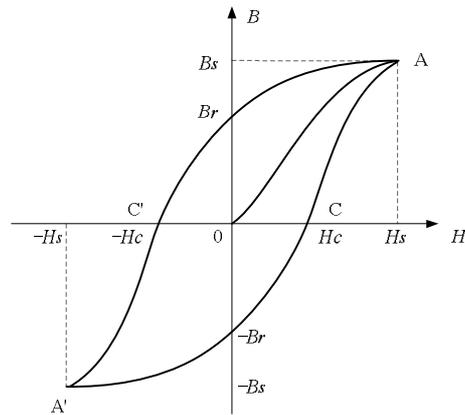


图 3 磁化曲线和磁滞回线

3. 用示波器测量动态磁化曲线和磁滞回线

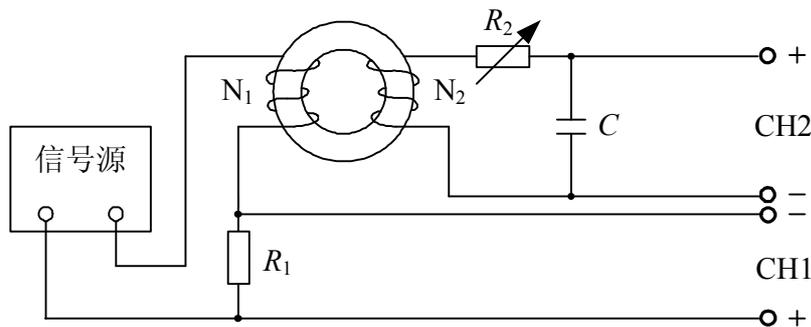


图 4 用示波器测量动态磁化曲线和磁滞回线的电路图

图 4 为用示波器测量动态磁化曲线和磁滞回线的电路图. 本实验研究的是闭合状的铁磁圆环样品, 铁磁样品平均磁路为 L , 励磁线圈的匝数为 N_1 , 若励磁电流为 i_1 时, 在样品内根据安培环路定律, 有

$$HL = N_1 i_1 \quad (2)$$

则示波器 X 轴偏转板输入电压

$$U_{R_1} = R_1 i_1 = \frac{R_1 L}{N_1} H \quad (3)$$

式中的 R_1 、 L 、 N_1 均为常数，这表明 X 轴输入电压的大小 U_{R_1} 与磁场强度 H 成正比。

设样品的截面积为 S ，根据电磁感应定律，在匝数为 N_2 的次级线圈中，感应电动势为

$$\varepsilon_2 = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

考虑带次级线圈的匝数 N_2 较少，自感电动势可忽略，在 R_2 、 C 所构成的回路中适当的选取 R_2 、 C 值使得 $R_2 \gg 1/\omega C$ ，则

$$\varepsilon_2 = R_2 i_2 \quad (5)$$

将 $i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}$ 代入 (5) 式，并利用 (4) 式可得

$$U_c = -\frac{N_2 S}{R_2 C} B \quad (6)$$

上式表明 Y 轴输入的大小 U_c 与磁感应强度 B 成正比。

4. 用交流电桥测量居里温度

铁磁材料的居里温度可用任何一种交流电桥测量。交流电桥种类很多，如麦克斯韦电桥、欧文电桥等，但大多数电桥可归结为如图 4 所示的四臂阻抗电桥，电桥的四个臂可以是电阻、电容、电感的串联或并联的组合。调节电桥的桥臂参数，使得 CD 两点间的电位差为零，电桥达到平衡，则有

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (7)$$

若要上式成立，必须使复数等式的模量和辐角分别相等，于是有

$$\frac{|Z_1|}{|Z_2|} = \frac{|Z_3|}{|Z_4|} \quad (8)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (9)$$

由此可见，交流电桥平衡时，除了阻抗大小满足（8）式外，阻抗的相角还要满足（9）式，这是它和直流电桥的主要区别。

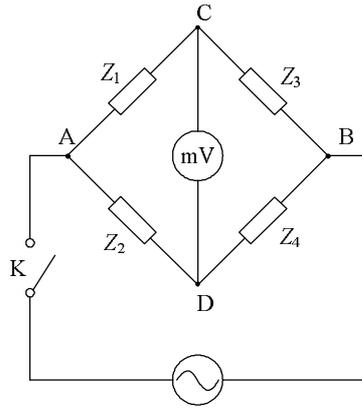


图5 交流电桥的基本电路

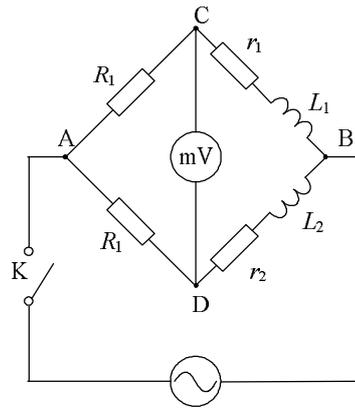


图6 RL 交流电桥

本实验采用如图 5 所示的 RL 交流电桥，在电桥中输入电源由信号发生器提供，在实验中应适当选择较高的输出频率， ω 为信号发生器的角频率。其中 Z_1 和 Z_2 为纯电阻， Z_3 和 Z_4 为电感（包括电感的线性电阻 r_1 和 r_2 ），其复阻抗为

$$Z_1 = R_1, Z_2 = R_2, Z_3 = r_1 + j\omega L_1, Z_4 = r_2 + j\omega L_2 \quad (11)$$

当电桥平衡时有

$$R_1(r_2 + j\omega L_2) = R_2(r_1 + j\omega L_1) \quad (12)$$

实部与虚部分别相等，得

$$r_2 = \frac{R_2}{R_1} r_1, \quad L_2 = \frac{R_2}{R_1} L_1 \quad (13)$$

选择合适的电子元件相匹配，在未放入铁氧体时，可直接使电桥平衡，但当其中一个电感放入铁氧体后，电感大小发生了变化，引起电桥不平衡。随着温度的上升到某一个值时，铁氧体的铁磁性转变为顺磁性， CD 两点间的电位差发生突变并趋于零，电桥又趋向于平衡，这个突变的点对应的温度就是居里温度。可通过桥路电压与温度的关系曲线，求其曲线突变处的温度，并分析研究在升温与降温时的速率对实验结果的影响。

由于被研究的对象铁氧体置于电感的绕组中，被线圈包围，所以当放入硅油中加热时，若加热速度过快，则硅油温度将与铁氧体实际温度不同（加热时，铁氧体温度低于油温，降温时，铁氧体温度高于油温），这种滞后现象在实验中必须加以重视。只有在动态平衡的条件下，磁性突变的温度才精确等于居里温度。

【仪器设备】

数字万用表，铂电阻温度计，加热装置，实验接线板，功率函数信号发生器，双踪示波器，被测样品和实验配件等。

【实验内容】

1. 在信号源频率（1 KHz ~ 2 KHz）一定条件下，观察 R_2 阻值不同时样品的磁化过程；
2. 选择合适的 R_2 值，测量此时的饱和磁滞回线；
3. 作磁滞回线图，同时计算这一条件下的样品参数（如 H_c 等）；
2. 用电桥法测量铁氧体的居里温度 T_C 。

【注意事项】

1. 测量过程中，需保持示波器的灵敏度 S_x 和 S_y 不变。

【参考资料】

- [1] 程守珠，江之永．普通物理学（第五版）．北京：高等教育出版社，1998
- [2] 赵凯华，陈熙谋．电磁学．北京：人民教育出版社，1980
- [3] 谢行怒，康士秀，霍剑青．大学物理实验（第二册）．北京：高等教育出版社，2001

实验十三 物体色度值的测量

研究光源或经光源照射后物体透、反射颜色的学科称为色度学。这是一门有着广泛应用的学科，目的是对人眼能观察到的颜色进行定量的测量。无论是在纺织、印染、印刷、染料、涂料、塑料、食品、油漆、建筑等行业，还是在计量、医学、电视、电影、照相、环境美化、交通信号、产品鉴定以及遥感、信息处理和空间光学等各个领域，都离不开对颜色的测量和研究。

色度学本身涉及到物理、生理及心理等领域的知识，是一门交叉性很强的边缘学科。为了把“颜色”这个经过生理及心理等因素加工后的生物物理量变换到客观的纯物理量，从而能使用光学仪器对色光进行测量，以消除那些因人而异，含混不清的颜色表达方式，需要经过大量的科学实验，将感性认识上升到理性阶段，再去指导人们对颜色的正确测量。

【实验目的】

1. 了解并掌握测色原理；
2. 了解 1931CIE xy 色度图的作用；
3. 计算滤色镜的色度值。

【实验原理】

1. 色度学的两个实验结论

通过大量的有关人眼对颜色的实验，可总结出两个基本的实验事实：一个事实是三原色合成法则，即任何颜色都能用不多于三种的合适的单色光按一定比例混合得到，这三种色光被称为三原色。这三种单色光一般选取 R（红）、G（绿）、B（蓝）三色；第二个事实是颜色的加法法则，即在一定的观察条件下，颜色的混合满足简单相加关系，而这个一定的观察条件是相当宽的，一般的应用中都能够满足。

在很多地方我们都可看到这两个法则的运用。最直接的，大家贴近仔细地瞧正在发光的电脑显示屏或电视机显示屏，就可看到白色的屏，是由红、绿、蓝三种颜色的小发光点或条组成的。

2. 颜色三刺激值和色度空间

国际照明委员会（简称 CIE）规定 R、G、B 三原色的波长分别为 700 nm、546.1 nm 和 435.8 nm。在颜色的匹配实验（所谓匹配，就是用三原色去凑到与待测的色光一致）中发现，当这三原色光的相对亮度比例为 1.0000：4.5907：0.0601 时就能匹配出等能白光。所以 CIE 选取这一比例作为红、绿、蓝三原色的各自单位量，分别记为 (R)、(G)、(B)，即当颜色为等能白光时 (R)：(G)：(B) = 1：1：1。显然，当 (R)、(G)、(B) 不等份时，混合的结果为色光，颜色匹配可用颜色方程表示

$$C = R(R) + G(G) + B(B) \quad (1)$$

式中 C 表示待配色光，(R)、(G)、(B) 代表产生混合色的红、绿、蓝三原色的单位量。R、G、B 分别为匹配待配色所需要的红、绿、蓝三原色单位量的份数，这个份数被称为颜色刺

激值，相当于色光 C 中的权重。

按照颜色的加法法则，权重的比例不变，颜色就不变，但总的光能可以变化，所以 C 的数值大小表示了亮度。很明显，当红、绿、蓝三原色单位量已定的条件下，对某一色光来说 R、G、B 的各份量大小是唯一确定的，所以我们可以用 R、G、B 构成一个色度空间，而 C 是色度空间的一个点。又因为红、绿、蓝三原色的单位化只是一个比例关系，可相差一个比例常数，所以 C 的坐标不用 R、G、B 直接表示，而是用在总量中占的比例，即 R、G、B 的相对大小来表示。

3. 光谱三刺激值和 1931CIE-XYZ 标准色度系统

如果取色光 C 为单一波长的光，那么匹配所得到的份数就是这个单色光的刺激值。如果 C 的波长遍及可见光范围，则可得到刺激值按波长的变化，这个变化称为光谱三刺激值。它反映了人眼对光~色转换按波长变化的规律，这是颜色定量测量的基础。这相当于眼睛有三个独立的探测通道，每一个通道的光谱灵敏度即光谱响应就是光谱三刺激值。显然，为了得到正确的光谱三刺激值，每一被测波长光的光强必须相等。

CIE-RGB 光谱三刺激值是以 317 位正常视觉者，用 CIE 规定的红、绿、蓝三原色光，对等能光谱色从 380 nm 到 780 nm 所进行的专门性颜色混合匹配实验得到的。实验时，匹配到光谱中某个一波长为等能光谱色时所需要的红、绿、蓝三原色数量，称为 CIE-RGB 光谱三刺激值，记为 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 。它是 CIE 在对等能光谱色进行匹配时用来表示红、绿、蓝三原色的专用符号。因此，匹配某波长 λ 的等能光谱色 C (λ) 的颜色方程为

$$C(\lambda) = \bar{r}(\lambda)(R) + \bar{g}(\lambda)(G) + \bar{b}(\lambda)(B) \quad (2)$$

上面介绍的表色系统称为 1931CIE-RGB 真实三原色表色系统，但在实际应用中十分不便，因此 CIE 推荐了一个新的国际色度学系统—1931CIE-XYZ 系统，又称为 XYZ 国际坐标制。它是通过对 R、G、B 三刺激值进行坐标转换完成的。其转换关系如式 3 所示：

$$\begin{aligned} X &= 0.490R + 0.310G + 0.200B \\ Y &= 0.177R + 0.812G + 0.011B \\ Z &= 0.010G + 0.990B \end{aligned} \quad (3)$$

对应的光谱三刺激值记为 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 。其中 $\bar{y}(\lambda)$ 曲线被调整到恰好等于明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 。因而用 $\bar{y}(\lambda)$ 曲线还可以用来计算一个色光的亮度特性。 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 按波长的变化如图 1 所示。

明视觉光谱效率函数是指在明视觉条件下，用等能光谱色照射时，亮度随波长变化的相对关系，它反映了人眼对光的亮度感觉。式 (2) 中的 C (λ) 在数值上表示等能光谱色的相对亮度，就是 $V(\lambda)$ 。如图 2 所示，其中最大值为 C (555)。

4. 色度坐标

同样，在 XYZ 标准色度系统中，色度空间坐标也用三原色各自在 (X + Y + Z) 总量

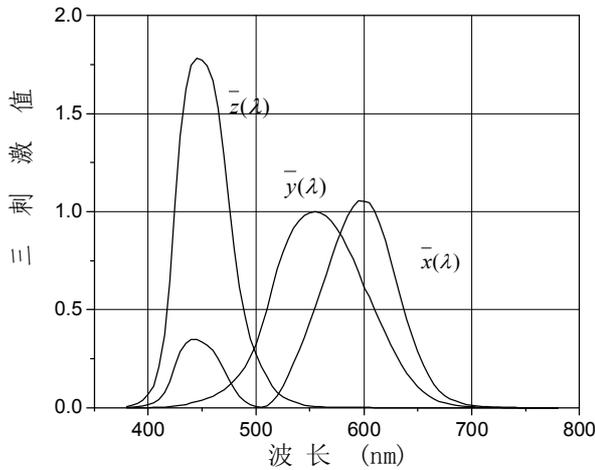


图1 CIE 1931 标准色度观察者光谱三刺激值

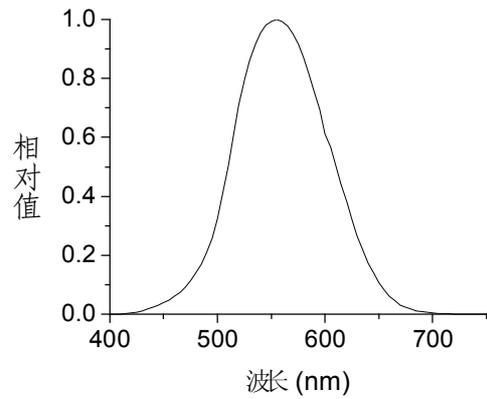


图2 明视觉光谱效率函数 $V(\lambda)$

中的相对比例来表示。

除颜色的明度可直接由 Y 表示外，其余的三个色度坐标分别为

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \end{aligned} \tag{4}$$

由于 $(x + y + z) = 1$ ，故色度坐标一般只选用 x 、 y 即可。

5. 色度图

在颜色匹配实验中所得到的 R、G、B 的量值称为颜色三刺激值。在 XYZ 标准色度系统中就是 X、Y、Z。综上所述，任何颜色光都可以被分解为三个对人眼的颜色刺激值 X、Y、Z。因此，包括光源颜色，物体的透、反射颜色等等自然界所能观察到的任何颜色均能由 Y、 x 、 y 这三个参数来表征，其中 x 、 y 表示了色调、饱和度，而 Y 表示了亮度。

把上述的规律归纳起来，可以集中地表示在 1931CIE-xy 色度图中。如图 3，色度图的 x 坐标相当于红原色的比例， y 坐标相当于绿原色的比例。因为 $z = 1 - (x + y)$ ，则蓝原色的比例就无需给出。图中的偏马蹄形曲线是光谱轨迹。连接 400 nm 和 700 nm 的直线是无法用单色可见光表示的紫红色，它

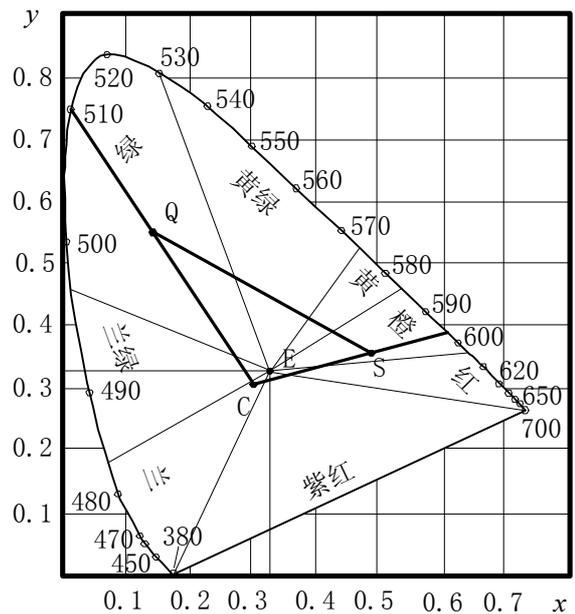


图3 1931CIE xy 色度图

是由光谱两端的红和紫色混合后所得到的非光谱色。凡是偏马蹄形曲线内部的所有坐标点（包括这条封闭曲线本身）都是物理上能够实现的颜色。

由于三原色的份量各占 1/3，所以色度坐标为 $x = y = z = 0.33$ 的 E 点称为“等能白”。这是一个假想的白光，而用于颜色测量中的三个由 CIE 规定的标准光源 A、C、D 则分别位于 E 点的周围（物体的颜色与照明光源有关）。

例如颜色 Q 的坐标为： $x_Q = 0.16$ 、 $y_Q = 0.55$ ，颜色 S 的坐标为： $x_S = 0.50$ 、 $y_S = 0.34$ 。在用标准 C 光源照明时，可由 C 点过 Q 作一直线至光谱轨迹相交处，即得知颜色 Q 的主波长为 511.3 nm。此处光谱轨迹上的颜色就相当于颜色 Q 的色调（绿色）。同理，由 C 点经 S 点连线后交于光谱轨迹上，又可得颜色 S 的主波长为 595 nm（橙色）。某一颜色离开 C 点接近光谱轨迹的程度表明此颜色的纯度，即相当于它的饱和度。愈靠近光谱轨迹处，颜色的纯度愈高。QS 联线上将能得到此橙绿两种颜色相混合后的各种中间色。过 C 点的直线交于光谱轨迹上两个交点，系表示此两种颜色成互补关系。即是说，凡过 C 点所有直线的端点对应出的这两个颜色经适当混合后将会得到中性色。

6. 标准照明体 A 和标准光源 A

我们知道，照明光源对物体的颜色影响很大。不同的光源，有着各自的光谱能量分布及颜色，在它们的照射下物体表面呈现的颜色也随之变化。为了统一对颜色的认识，首先必须规定标准的照明光源。因为光源的颜色与光源的色温密切相关，所以 CIE 规定了标准照明体的色温标准，其中常用的是标准照明体 A，代表黑体在 2856K 发出的光 ($X_0 = 109.87$, $Y_0 = 100.00$, $Z_0 = 35.59$)。

CIE 规定的标准照明体是指特定的光谱能量分布，并不是一个物理上的光源。为了实现 CIE 规定的标准照明体的要求，还必须规定标准光源，以具体实现标准照明体所要求的光谱能量分布。对于标准照明体 A，CIE 推荐的标准光源 A 为色温为 2856 K 的充气螺旋钨丝灯，其光色偏黄。其光谱分布如图 4 所示。

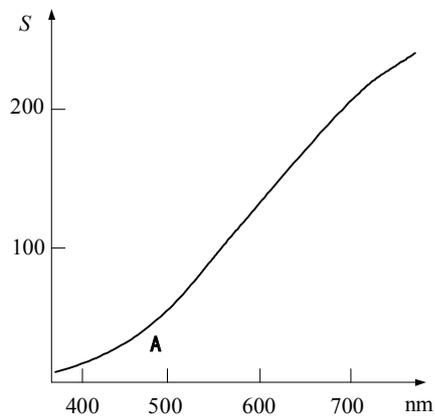


图 4 A 光源的功率分布

7. 光的色度学参数计算方法

前面已指出，任何颜色光都可以被分解为三个对人眼的颜色刺激值 X、Y、Z。所以颜色的测量就归结于如何计算 X、Y、Z。而计算的基础就是人眼的光 ~ 色转换规律：光谱三刺激值。

由于光谱三刺激值是在等能光谱色条件下测定的，而要探测的光的光强按波长有强弱的变化，必须对光谱刺激值按探测的光的光强变化乘上一个比例因子。很容易想到，这个比例因子就是被测光的光谱功率分布——光强与波长的关系。又考虑到色光加法原理我们即可得出 X、Y、Z 的计算方法：

如果用 $S(\lambda)$ 表示某待测光源的相对光谱功率分布，则该光源的三刺激值应为

$$\begin{aligned}
X &= k \int S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
Y &= k \int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
Z &= k \int S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda
\end{aligned} \tag{5}$$

式中, 常数 $k = \frac{100}{\int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$, 称为调整因子, 它是将 Y 值调整为 100% 时得到的常数项. 光谱刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 可由查表得到. 所以只要测得 $S(\lambda)$ 就能计算 X、Y、Z, 进而

根据式 (4) 求出色度坐标.

在实际计算时, 积分可用求和代替:

$$\begin{aligned}
X &= k \sum S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\
Y &= k \sum S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\
Z &= k \sum S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda
\end{aligned} \tag{6}$$

例: 已测量到被测光谱 $S(\lambda)$ 由两根线谱构成, 其波长为 500 nm, 600 nm, 光强比为 2:1, 线宽为 $\Delta\lambda = 1$ nm. 在此基础上加一滤色片, 此时测得的光强分别是原来的 1/4 和 1/2, 分别计算 Y, x, y, 并简单讨论.

由图 1 或附表可查得:

波长为 500 nm 的光谱三刺激为: $\bar{x}(\lambda) = 0.00$, $\bar{y}(\lambda) = 0.32$, $\bar{z}(\lambda) = 0.27$

波长为 600 nm 的光谱三刺激为: $\bar{x}(\lambda) = 1.05$, $\bar{y}(\lambda) = 0.61$, $\bar{z}(\lambda) = 0.00$

$$X = k(2 \times 0.00 + 1 \times 1.05) = 1.05k$$

$$Y = k(2 \times 0.32 + 1 \times 0.61) = 1.25k$$

$$Z = k(2 \times 0.27 + 1 \times 0.00) = 0.54k$$

$k = 100/1.25 = 80.0$, 所以有 $X = 84$, $Y = 100$, $Z = 43$, 这里 $Y = 100$, 其意义是把被测光当作光源看, 其相对亮度为 100%, 算出 $x = 0.38$, $y = 0.45$. 由图 4 可知其坐标点位于黄绿区, 而且近于 E 点, 偏白, 说明颜色的纯度不高, 虽然单根谱线的纯度为 100%

加入滤色片后

$$X = k(2 \times 1/4 \times 0.00 + 1 \times 1/2 \times 1.05) = 0.52k = 42$$

$$Y = k(2 \times 1/4 \times 0.32 + 1 \times 1/2 \times 0.61) = 0.46k = 37$$

$$Z = k(2 \times 1/4 \times 0.27 + 1 \times 1/2 \times 0.00) = 0.54k = 43$$

这里的 k 要用前面已算出的值, 由此可见, 由于滤色片的加入, $Y = 37\%$, 即其亮度减少了 63%, $x = 0.49$, $y = 0.42$. 由图 4 可知其坐标点由于滤色片的影响而偏向于红区.

对透射物体而言, 公式 (6) 中的 $S(\lambda)$ 项将包含两个内容: $S(\lambda) = S_N(\lambda)\tau(\lambda)$. 其中 $S_N(\lambda)$ 是透射某物体时所用光源的相对光谱功率分布, 常用的光源是标准 A 光源. 而透射率 $\tau(\lambda)$ 则

是表示在某个波长值下，出射光强与入射光强的比值，即

$\tau(\lambda) = \frac{E_o(\lambda)}{E_i(\lambda)}$ 。因此，对透视物体的颜色三刺激值有

$$\begin{aligned} X &= k \int S_A(\lambda) \tau(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int S_A(\lambda) \tau(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int S_A(\lambda) \tau(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (7)$$

同理，对反射物体也是相应处理，其实，我们关心的只是光的功率谱 $S(\lambda)$ 。至于如何得到它并不是色度学所关心的。

表 1 列出了 CIE 标准照明体 A（即：标准 A 光源）的相对功率谱和 CIE 1931 标准观察者光谱三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 的加权值，以便于实验结果计算。

【实验仪器】

平面光栅单色仪、光电倍增管、标准 A 光源和 R、G、B 色滤色镜等。

【实验内容】

1. 画一张 1931CIE-xy 色度图，建议用 oringin 画这张图，画这张图时需要大量的数据，我们已经放在了选课网上（进入“实验预习”后选择本实验即可），是 excell 形式，很容易与 oringin 接口（也可参见附图 1）。

2. 安排合理的光路，测量 R、G、B 三色滤色镜的透过率 $\tau(\lambda)$ 。

3. 用实验室给出的标准 A 光源校准整个测量系统的光谱响应，在此基础上测量色光源的光谱。设标准 A 光源的光谱为 $S_A(\lambda)$ ，未知色光源的光谱为 $S_X(\lambda)$ ，测量系统的光谱响应为 $D(\lambda)$ ，对两个光源分别测量可得到： $A_1(\lambda) = D(\lambda) S_A(\lambda)$ ， $A_2(\lambda) = D(\lambda) S_X(\lambda)$ 。所以有：

$$S_X(\lambda) = \frac{A_2(\lambda)}{A_1(\lambda)} S_A(\lambda) \quad (8)$$

4. 作 R、G、B 三色滤色镜的透过率曲线和色光源的发光光谱曲线，计算色度值 Y、x、y，并在 1931CIE-xy 色度图上作图，求出主波长并讨论。

为保证实验精度， $\Delta\lambda$ 的取值不能太大，实验中可从 400 nm 开始，每隔 10 nm 读取一个数值，直至 750 nm 为止。在实验前，请仔细阅读有关实验仪器的使用说明。

【思考题】

1. 什么是光谱三刺激值？光谱三刺激值有什么意义？
2. 什么是颜色三刺激值？它与光谱三刺激值是什么关系？

【参考资料】

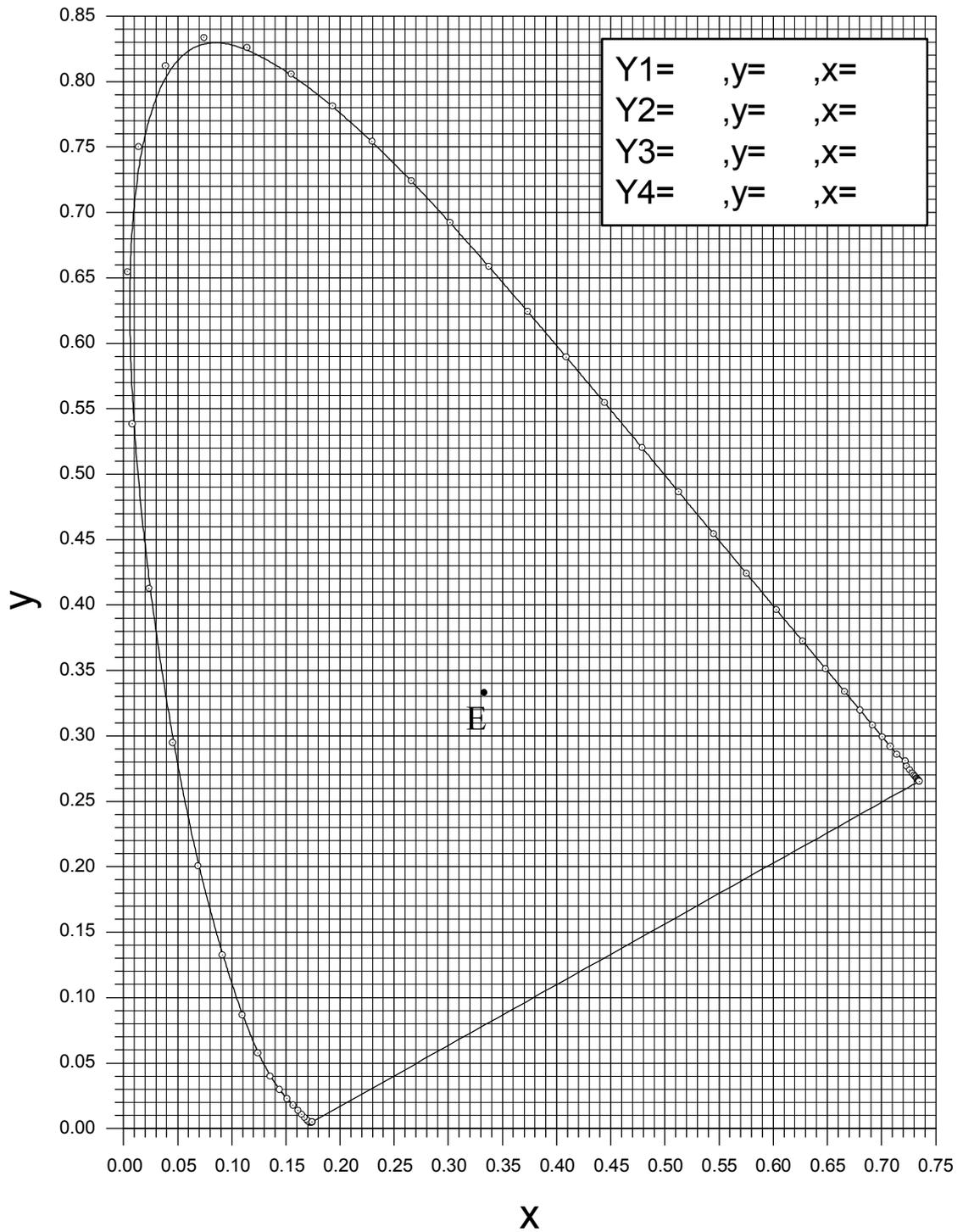
- [1] 崔唯编著. 色彩构成. 北京: 中国纺织出版社, 1996
- [2] 安宁编著. 色彩原理与色彩构成. 北京: 中国美术学院出版社, 1999
- [3] 汤顺青主编. 色度学. 北京: 北京理工大学出版社, 1990
- [4] 杜功顺编. 印刷色彩学. 印刷工业出版社, 1995

【附录】

CIE 标准照明体 A 与光谱三刺激值的加权值

($\lambda = 380 - 780 \text{ nm}$; $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$)

波长 $\lambda(\text{nm})$	$S_{A(\lambda)}\bar{x}_{(\lambda)}$	$S_{A(\lambda)}\bar{y}_{(\lambda)}$	$S_{A(\lambda)}\bar{z}_{(\lambda)}$	波长 $\lambda(\text{nm})$	$S_{A(\lambda)}\bar{x}_{(\lambda)}$	$S_{A(\lambda)}\bar{y}_{(\lambda)}$	$S_{A(\lambda)}\bar{z}_{(\lambda)}$
380	0.0006	0.0000	0.0029	580	4.8594	4.6139	0.0090
385	0.0011	0.0000	0.0053	585	5.3549	4.4668	0.0077
390	0.0024	0.0000	0.0113	590	5.7896	4.2704	0.0062
395	0.0047	0.0001	0.0224	595	6.1403	4.0379	0.0058
400	0.0097	0.0003	0.0463	600	6.3518	3.7733	0.0048
405	0.0174	0.0004	0.0825	605	6.4299	3.4855	0.0037
410	0.0356	0.0010	0.1699	610	6.3345	3.1780	0.0019
415	0.0694	0.0020	0.3319	615	6.0877	2.8622	0.0013
420	0.1308	0.0039	0.6283	620	5.6865	2.5358	0.0013
425	0.2269	0.0077	1.0974	625	5.1267	2.1901	0.0007
430	0.3246	0.0133	1.5840	630	4.4962	1.8523	0.0000
435	0.4055	0.0207	2.0036	635	3.8779	1.5529	0.0000
440	0.4632	0.0306	2.3236	640	3.2791	1.2812	0.0000
445	0.4976	0.0426	2.5484	645	2.7004	1.0344	0.0000
450	0.5155	0.0583	2.7173	650	2.1681	0.8183	0.0000
455	0.5230	0.0788	2.8621	655	1.7078	0.6372	0.0000
460	0.5097	0.1052	2.9254	660	1.3141	0.4861	0.0000
465	0.4690	0.1380	2.8539	665	0.9850	0.3625	0.0000
470	0.3882	0.1808	2.5581	670	0.7241	0.2651	0.0000
475	0.2998	0.2375	2.1979	675	0.5368	0.1958	0.0000
480	0.2138	0.3108	1.8179	680	0.4022	0.1461	0.0000
485	0.1372	0.4004	1.4575	685	0.2877	0.1041	0.0000
490	0.0799	0.5196	1.1322	690	0.2019	0.0729	0.0000
495	0.0387	0.6813	0.9608	695	0.1429	0.0515	0.0000
500	0.0136	0.8960	0.7545	700	0.1047	0.0377	0.0000
505	0.0070	1.1878	0.6191	705	0.0756	0.0271	0.0000
510	0.0285	1.5398	0.4843	710	0.0549	0.0199	0.0000
515	0.0934	1.9818	0.3585	715	0.0394	0.0144	0.0000
520	0.2127	2.3855	0.2627	720	0.0283	0.0097	0.0000
525	0.3849	2.7859	0.2012	725	0.0158	0.0069	0.0000
530	0.6069	3.1609	0.1547	730	0.0140	0.0050	0.0000
535	0.8631	3.4987	0.1140	735	0.0101	0.0041	0.0000
540	1.1567	3.7999	0.0809	740	0.0072	0.0031	0.0000
545	1.4904	4.0616	0.0555	745	0.0052	0.0021	0.0000
550	1.8660	4.2841	0.0375	750	0.0032	0.0010	0.0000
555	2.2887	4.4701	0.0255	755	0.0021	0.0010	0.0000
560	2.7550	4.6110	0.0181	760	0.0021	0.0010	0.0000
565	3.2564	4.6974	0.0130	765	0.0011	0.0000	0.0000
570	3.7853	4.7285	0.0101	770	0.0011	0.0000	0.0000
575	4.3259	4.7002	0.0092	775	0.0000	0.0000	0.0000
580	4.8594	4.6139	0.0090	780	0.0000	0.0000	0.0000
				总和: X, Y, Z x, y, z	109.8472 0.4476	100.0000 0.4074	35.5824 0.1450



附图1 1931CIE-xy 色度图

说明：请把 Y, y, x 值填在表中右上方的栏目中，其中第一栏参数对应的是 A 光源。

实验十四 扫描隧道显微镜 (STM)

1982年,IBM瑞士苏黎士实验室的葛·宾尼(Gerd Binnig)和海·罗雷尔(Heinrich Rohrer)研制出世界上第一台扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope,简称STM)。STM使人类第一次能够实时地观察单个原子在物质表面的排列状态和与表面电子行为有关的物化性质,在表面科学、材料科学、生命科学等领域的研究中有着重大的意义和广泛的应用前景,被国际科学界公认为80年代世界十大科技成就之一。为表彰STM的发明者们对科学研究的杰出贡献,1986年宾尼和罗雷尔被授予诺贝尔物理学奖。

与其它表面分析技术相比,STM具有如下独特的优点:

1. 具有原子级高分辨率,STM在平行和垂直于样品表面方向的分辨率分别可达0.1nm和0.01nm,即可以分辨出单个原子。
2. 可实时再现样品表面的三维图象,用于对表面结构的研究及表面扩散等动态过程的研究。
3. 可以观察单个原子层的局部表面结构,因而可直接观察到表面缺陷、表面重构、表面吸附体的形态和位置。
4. 可在真空、大气、常温等不同环境下工作,样品甚至可浸在水和其它溶液中,不需要特别的制样技术并且探测过程对样品无损伤。这些特点特别适用于研究生物样品和在不同实验条件下对样品表面的评价,例如对于多相催化机理、超导机制、电化学反应过程中电极表面变化的监测等。
5. 配合扫描隧道谱(STS)可以得到有关表面电子结构的信息,例如表面不同层次的态密度、表面电子阱、电荷密度波、表面势垒的变化和能隙结构等。
6. 利用STM针尖,可实现对原子和分子的移动和操纵,这为纳米科技的全面发展奠定了基础。

STM也存在因本身的工作方式所造成的局限性。STM所观察的样品必须具有一定的导电性,因此它只能直接观察导体和半导体的表面结构,对于非导电材料,必须在其表面覆盖一层导电膜,但导电膜的粒度和均匀性等问题会限制图象对真实表面的分辨率。然而,有许多感兴趣的研究对象是不导电的,这就限制了STM应用。另外,即使对于导电样品,STM观察到的是对应于表面费米能级处的态密度,如果样品表面原子种类不同,或样品表面吸附有原子、分子时,即当样品表面存在非单一电子态时,STM得到的并不是真实的表面形貌,而是表面形貌和表面电子性质的综合结果。

【实验目的】

1. 学习和了解扫描隧道显微镜的原理和结构;
2. 观测和验证量子力学中的隧道效应;
3. 学习掌握扫描隧道显微镜的操作和调试过程,并以之来观察样品的表面形貌;
4. 学习用计算机软件处理原始数据图象。

【实验仪器】

NanoView-I型扫描隧道显微镜,Pt-Ir金属探针,金薄膜(团簇)样品,高序石墨(HOPG)

样品等。

【实验原理】

1. 隧道电流

扫描隧道显微镜的工作原理是基于量子力学的隧道效应。对于经典物理学来说，当一粒子的动能 E 低于前方势垒的高度 V_0 时，它不可能越过此势垒，即透射系数等于零，粒子将完全被弹回。而按照量子力学的计算，在一般情况下，其透射系数不等于零，也就是说，粒子可以穿过比它的能量更高的势垒，这个现象称为隧道效应，它是由于粒子的波动性而引起的，只有在一定的条件下，这种效应才会显著。经计算，透射系数

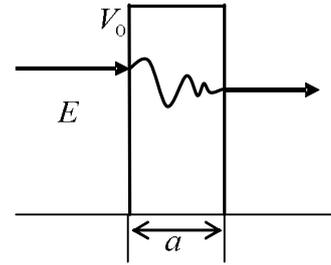


图1 量子力学中的隧道效应

$$T \approx \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} e^{-\frac{2a}{h}\sqrt{2m(V_0 - E)}} \quad (1)$$

由式中可见，透射系数 T 与势垒宽度 a 、能量差 $(V_0 - E)$ 以及粒子的质量 m 有着很敏感的依赖关系，随着 a 的增加， T 将指数衰减，因此在宏观实验中，很难观察到粒子隧穿势垒的现象。

扫描隧道显微镜是将原子线度的极细探针和被研究物质的表面作为两个电极，当样品与针尖的距离非常接近时（通常小于 1 nm），在外加电场的作用下，电子会穿过两个电极之间的势垒流向另一电极。隧道电流 I 是针尖的电子波函数与样品的电子波函数重叠的量子度，与针尖和样品之间距离 S 和平均功函数 Φ 有关

$$I \propto V_b \exp(-A\Phi^{1/2}S) \quad (2)$$

式中 V_b 是加在针尖和样品之间的偏置电压，平均功函数 $\Phi \approx (\Phi_1 + \Phi_2) / 2$ ， Φ_1 和 Φ_2 分别为针尖和样品的功函数， A 为常数，在真空条件下约等于 1。隧道探针一般采用直径小于 1mm 的细金属丝，如钨丝、铂-铱丝等，被观测样品应具有一定的导电性才可以产生隧道电流。

由 (2) 式可知，隧道电流强度对针尖和样品之间的距离有着指数的依赖关系，当距离减小 0.1nm，隧道电流即增加约一个数量级。因此，根据隧道电流的变化，我们可以得到样品表面微小的高低起伏变化的信息，如果同时对 $x-y$ 方向进行扫描，就可以直接得到样品的表面三维形貌图。

2. STM 的结构和工作模式

STM 仪器由具有减振系统的 STM 头部、电子学控制系统和包括 A/D 多功能卡的计算机组成（图 2）。头部的主要部件是用压电陶瓷做成的微位移扫描器，在 $x-y$ 方向

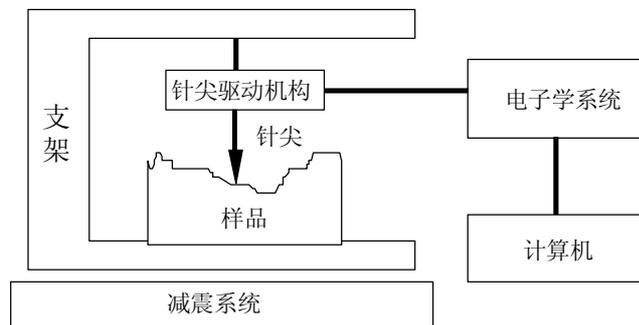


图2 STM 基本构成

扫描电压的作用下，扫描器驱动探针在导电样品表面附近作 $x-y$ 方向的扫描运动。与此同时，由差动放大器来检测探针与样品间的隧道电流，并把它转换成电压，反馈到扫描器，作为探针 z 方向的部分驱动电压，以控制探针作扫描运动时离样品表面的高度。

STM 常用的工作模式主要有以下两种：

(1) 恒流模式

如图 3 (a)，利用压电陶瓷控制针尖在样品表面 $x-y$ 方向扫描，而 z 方向的反馈回路控制隧道电流的恒定，当样品表面凸起时，针尖就会向后退，以保持隧道电流的值不变，当样品表面凹进时，反馈系统将使得针尖向前移动，则探针在垂直于样品方向上高低的变化就反映出了样品表面的起伏。将针尖在样品表面扫描时运动的轨迹记录并显示出来，就得到了样品表面态密度的分布或原子排列的图像。这种工作模式可用于观察表面形貌起伏较大的样品，且可通过加在 z 方向的驱动电压值推算表面起伏高度的数值。恒流模式是一种常用的工作模式，在这种工作模式中，要注意正确选择反馈回路的时间常数和扫描频率。

(2) 恒高模式

如图 3 (b)，针尖的 $x-y$ 方向仍起着扫描的作用，而 z 方向则保持绝对高度不变，由于针尖与样品表面的局域高度会随时发生变化，因而隧道电流的大小也会随之明显变化，通过记录扫描过程中隧道电流的变化亦可得到表面态密度的分布。恒高模式的特点是扫描速度快，能够减少噪音和热漂移对信号的影响，实现表面形貌的实时显示，但这种模式要求样品表面相当平坦，样品表面的起伏一般不大于 1 nm ，否则探针容易与样品相撞。

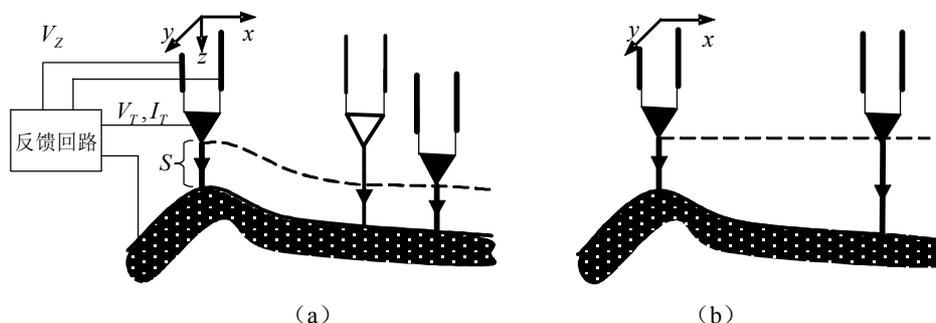


图 3 扫描隧道显微镜的两种工作模式 (a) 恒电流模式 (b) 恒高度模式

【实验内容】

1. 准备和安装样品、针尖

针尖在扫描隧道显微镜头部的金属管中固定，露出头部约 5 毫米。

将样品放在样品座上，应保证良好的电接触。将下部的两个螺旋测微头向上旋起，然后把头部轻轻放在支架上(要确保针尖和样品间有一定的距离)，头部的两边用弹簧扣住。小心地细调螺旋测微头和手动控制电机，使针尖向样品逼近，用放大镜观察，在针尖和样品相距约 $0.5-1$ 毫米处停住。

2. 金膜表面的原子团簇图像扫描

运行 STM 的工作软件，单击“在线扫描”，出现“STM 扫描控制”控制界面。

“隧道电流”置为 $0.25-0.3\text{ nA}$ ，“针尖偏压”置为 $200-250\text{ mV}$ ，“扫描范围”设为 1000 nm 左右，“扫描角度”设为 $0-90$ 度，“扫描速度”设为 0.1 s/行 左右，“采样”设为

256, “放大倍率”设为 1; 选择“马达控制”, 点击“自动进”, 马达自动停止后, 不断点击“单步进”或“单步退”, 直到“隧道电流”的显示杆落入||区域之内; 如此时“平衡”的显示杆尚未进入相应的||区域之内, 可使用控制箱面板上的“平衡”旋钮, 将其调入; 选择“扫描方式”, 点击“恒流模式”进行扫描.

扫描结束后一定要将针尖退回!“马达控制”用“自动退”, 然后关掉马达和控制箱.

3. 图像处理

(1) 平滑处理: 将像素与周边像素作加权平均.

(2) 斜面校正: 选择斜面的一个顶点, 以该顶点为基点, 线形增加该图像的所有像数值, 可多次操作.

(3) 中值滤波: 对当前图像作中值滤波.

(4) 傅立叶变换: 对当前图像作 FFT 滤波, 此变换对图像的周期性很敏感, 在作原子图像扫描时很有用.

(5) 边缘增强: 对当前图像作边缘增强, 使图像具有立体浮雕感.

(6) 图像反转: 对当前图像作黑白反转.

(7) 三维变换: 使平面图像变换为立体三维图像, 形象直观.

4. 高序石墨原子 (HOPG) 图像的扫描 (选做)

在上面实验的基础上, 可进一步扫描石墨表面的碳原子. 用一段透明胶均匀地按在石墨表面上, 小心地将其剥离, 露出新鲜石墨表面, 保证样品台和样品座之间有着良好的电接触. 采用恒流工作模式, 先将“隧道电流”置于 $0.25\sim 0.3\text{ nA}$, “针尖偏压”置于 $-200\sim -250\text{ mV}$, “扫描范围”设为 1000 nm 左右, “扫描角度”设为 $0\sim 90$ 度, “扫描速度”设为 0.1 s/行 左右, “采样”设为 256, “放大倍率”设为 1, 找出新鲜的石墨表面台阶; 在两台阶之间选取一块平坦的地方, 逐渐减小扫描范围, 提高隧道电流, 增加放大倍率 (5 倍或 25 倍, 直至能渐渐看到原子图像; 最后, “扫描范围”设为 10 nm 以下, “隧道电流”置于 0.45 nA 左右, “针尖偏压”置于 -255 mV 左右, 并细心地维持“平衡”的显示杆在||区域之内, 这样扫描约 20 分钟, 待其表面达到新的热平衡后, 可以得到比较理想的石墨原子排列图像.

【思考题】

1. 恒流模式和恒高模式各有什么特点?
2. 不同方向的针尖与样品间的偏压对实验结果有何影响?
3. 隧道电流设置的大小意味着什么?
4. 若隧道电流能在 2% 范围内保持不变, 试估算样品表面的高度测量的误差.

【参考文献】

- [1] G. Binnig and H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta*, 55 (1982) 726
- [2] H. -J. Guntherodt and R. Wiesendanger, *Scanning tunneling microscopy I-III*, Springer-Verlag, Berlin, 1992
- [3] 曾谨严, 量子力学, 科学出版社
- [4] 白春礼, 扫描隧道显微术及其应用, 上海科学技术出版社
- [5] C. Julian Chen, *Introduction to scanning tunneling microscopy*, Oxford University Press, 1993