

减速电势法测量功函数变化的实验方法

戴道宜 黄金林 庄承群 方小敏

(复旦大学现代物理研究所)

功函数 (work function) 定义为使电子脱离固体进入周围空间(真空)所必须给与电子的最低能量,有时也称为逸出功。它是表征固体表面宏观性质的重要物理量之一,一般随温度缓变,但随表面状况(如表面清洁度、晶向、结构、反应、化学组成、电荷转移等)变化灵敏,变化幅度一般从几十到几百毫电子伏 (meV)。对于 O/W(100) 系统,变化可大于 1eV^[1]。因此获取功函数随时间变化的信息对于各种瞬态表面现象的研究往往比测量功函数本身更为重要。自动连续测量固体表面某区域内功函数 ϕ 随时间 t 的变化曲线 $\phi(t)$ 比在不同时刻测量 ϕ , 再连成 $\phi(t)$ 曲线更为精确有效。

测量功函数的实验方法有开尔文法^[2,3]、热电子发射法、场发射法、光电子发射法以及电子束(或离子束)减速电势 (retarding potential) 法、扫描低能电子探针法等,目前后者已配合俄歇电子能谱仪等来进行表面研究。例如用于分子束外延设备中监控表面原子覆盖度的变化。自动连续测量功函数变化的仪器在国外已有商品出售,在我国尚为空白,急待填补。

本文给出了电子束减速电势法的测量原理及取得的初步实验结果。

一、电子束减速电势法测量功函数变化的原理

减速电势法于五十年代就有人提出,但在七十年代,由于采用交流调制和锁相检测技术,才发展成熟而被广泛使用^[1,4]。这一方法的主要点是采用低噪声的锁相放大器构成闭环工作

的微商检测系统,自动跟踪阴极发射电子的能量分布曲线的峰值位置。此法具有高灵敏度、高分辨率、能自动连续测量三大优点,并且不需要参考电极。此外测量精度仅与能量分布的峰值位置有关,而与分布曲线形状无关,故对电子枪无太苛刻的要求。缺点是要努力注意防止电子束引起的表面解脱等副效应。事实证明,取低电子束流 (10^{-7} — 10^{-8} A) 是有益的。

对于一个平板真空二极管,阳极收集电流密度

$$i_a = \bar{D} A T_k^2 \exp \left[\frac{q(U_a - \phi_c)}{k T_k} \right], \quad (1)$$

式中 U_a (负值) 为阳极与阴极间电压, ϕ_c 为阳极的功函数, T_k 为阴极温度, \bar{D} 为势垒的平均穿透系数, A 为理查逊常数, k 为玻耳兹曼常数, q 为电子电荷。当 T_k 和 i_a 恒定时,由 $\ln i_a - U_a$ 图上曲线的水平移动量 δU_a 可得 $\delta \phi_c$ 。可以设想,测量 $i_a - U_a$ 曲线的微商关系,可以更精确地测量功函数的变化,其原理图如图 1 所示。

当用电子枪系统获得的定向电子束垂直入

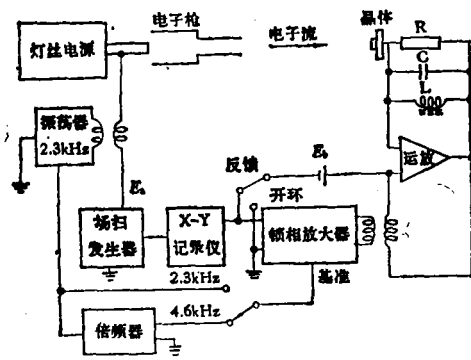


图 1 功函数连续测量装置电原理图

射到阳极时，阳极收集到的电子流的微商 $\frac{di_a}{dU_a}$ 与减速电压 U_a^0 的关系即为电子的能量分布曲线 (EDC)，一般为高斯分布。显然，由不同时刻 $\frac{di_a}{dU_a}-U_a$ 曲线的峰值或 $\frac{d^2i_a}{dU_a^2}-U_a$ 曲线的零点所对应的 U_a^0 的变化 δU_a^0 ，可测出阳极功函数的变化。

利用电势调制技术和锁相技术可方便地进行微商检测。应用图 1 所示的实验装置就可用三种不同的工作模式(开环一次微商、开环二次微商以及闭环二次微商)测量阳极(即样品)功函数的变化 $d\phi_c$ 。其中开环二次微商法，由于监视 EDC 微商的零点位置的移动量，比开环一次微商法监视 EDC 的峰点位置的移动量准确，但两者往往都要描出整条曲线，较费时间，也难于进行自动跟踪。闭环二次微商法既克服了上述缺点，又可进行自动连续测量功函数的变化。只要把 U_a 调节到 i_a-U_a 曲线“拐点”的附近，并使调制的交流小讯号峰值小于 EDC 曲线的半宽，当锁相放大器增益足够高时，锁相放大器的输出电压 $V_b = B \cdot d\phi_c$ (B 一般近于 1) 将自动跟踪样品功函数的变化 $d\phi_c$ ，而 $d\phi_c$ 值不受 EDC 曲线的形状细节(只要有一个主峰即可)、调制讯号幅度以及测试系统增益的影响，一般当调制讯号幅度为 100mV 时，系统跟踪范围已达 1.5V，能满足一般测量的要求。

二、实验结果

为了方便，起初我们用电子管 6AL5 进行实验模拟，以论证测试方案的可行性。实验中采用了我校电子工厂研制的 PIA-I 型锁相放大器。实验结果表明系统工作情况良好，主要实验结果如下。

1. 开环一次微商和开环二次微商曲线

用 6AL5 作样管，由 X-Y 记录仪测得的开环一次和二次微商曲线如图 2 所示。可见 EDC 曲线较接近于高斯分布， $\frac{di_a}{dU_a}$ 曲线 a 的峰点位

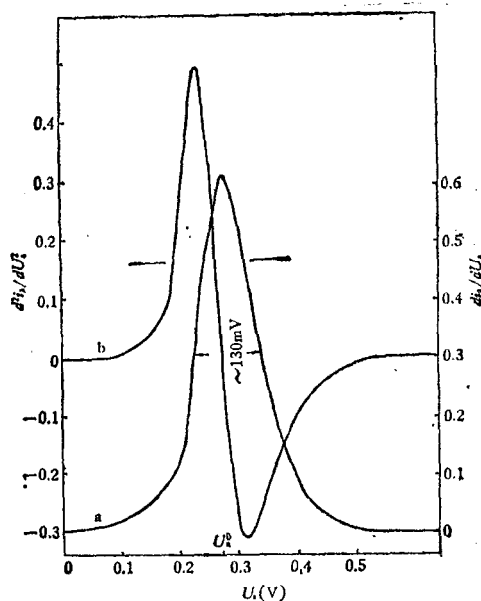


图 2 $\frac{di_a}{dU_a}$ 及 $\frac{d^2i_a}{dU_a^2}$ 随 U 变化的实验曲线
曲线 a 为 di_a/dU_a-U_a ；曲线 b 为 $d^2i_a/dU_a^2-U_a$ 。

置 U_a^0 与二次微商 $\frac{d^2i_a}{dU_a^2}$ 曲线 b 的零点位置重合，即 a 与 b 两曲线有合理的对应关系。由于在减速电压 U_a^0 处 d^2i_a/dU_a^2 曲线由正值经过零点变为负值，变化陡锐，可使测量精确度提高，且便于自动跟踪。

2. 自动跟踪特性

锁相放大器增益为 90db 时，对三种不同幅

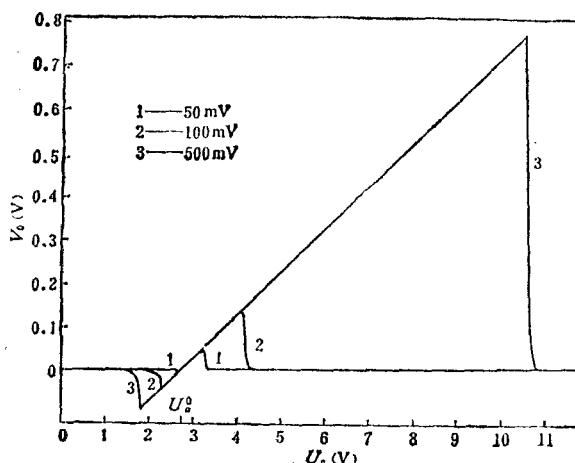


图 3 V_{b1} 不同时的跟踪曲线

1) 此处强调减速电压，用 U_a 、 U_a^0 及 δU_a^0 。下面文中和图 2、5 中，都用 U_a 及 U_a^0 表示。

度的交流调制讯号 V_{in} 用闭环二次微商模式测得的跟踪特性如图 3 所示。跟踪特性曲线的斜率都近于 1, 与调制信号的大小无关, 说明系统的跟踪特性良好。输出信号 V_o 的变化 dV_o 基本上能如实地反映功函数的变化 $d\phi_c$ 。此外, 跟踪曲线的零点 U_a^0 亦不随 V_{in} 而变, 调制信号的大小只影响跟踪范围, 调制幅度增大, 跟踪范围近于按平方律增加。当 V_{in} 为 100mV 时, 跟踪范围达 1.5V (已够用作功函数变化的测量), 即使取 500mV (已大于 EDC 的半宽 130mV) 时, 其线性仍较好。当 V_{in} 为 100mV 时, 不同锁相放大器增益下的跟踪特性如图 4 所示。其形状与图 3 很相近, 跟踪特性也较好。若减小输入信号幅度, 就要相应地提高锁相放大器的增益, 反之亦然。图 3 和图 4 从不同侧面反映系统的跟踪具有良好的线性, 从而保证功函数变化的测量可有较高的精度。目前的测试精度在 $\pm 10\text{meV}$ 左右。为了进行更精确的测量, 尚需采用性能更好的锁相放大器、更好的电子枪系统及整个测试系统的电磁屏蔽等。

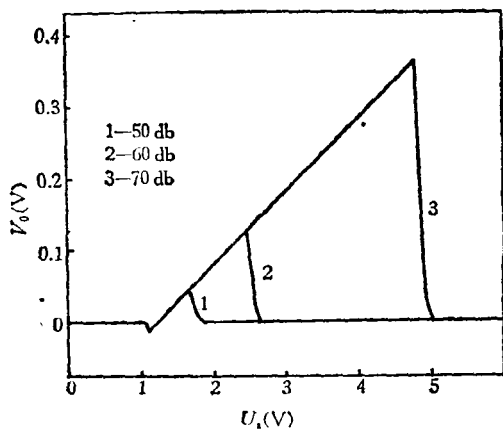


图 4 增益 g 不同时的跟踪曲线

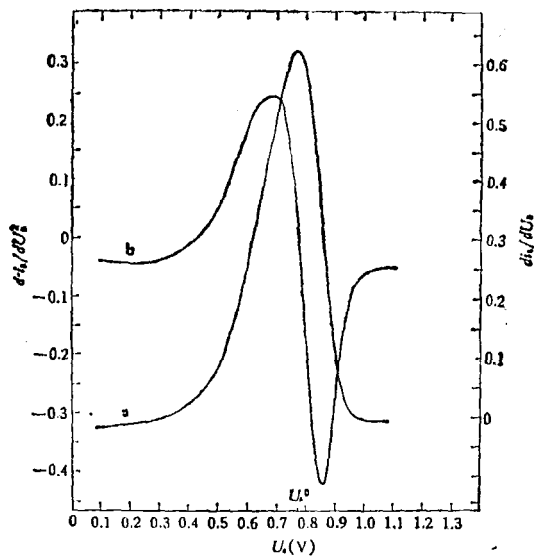


图 5 a 曲线为 di_a/dU_a-U_a ; b 曲线为 $d^2i_a/dU_a^2-U_a$

3. 系统的适用性

除用 6AL5 做样管外, 还用显象管及摄像管的电子枪与样品组成平板二极管进行了测量, 取得了相似的结果。图 5 中给出了用摄像管电子枪与样品组成的二极管系统测得的 $\frac{di_a}{dU_a}$ 及 $\frac{d^2i_a}{dU_a^2}$ 随 U_a 的变化曲线, 可见与用 6AL5 测得的曲线相似(跟踪曲线从略)。

感谢希德教授、王迅和陆栋副教授的热情指导。

参 考 文 献

- [1] R. Nathan and B. J. Hopkins, *J. Phys. E*, **7** (1974), 851.
- [2] Lord Kelvin, *Phil. Mag.*, **46** (1898), 82.
- [3] J. C. Tracy and J. M. Blarley, *Surf. Sci.*, **13** (1969), 313.
- [4] A. G. Knapp, *Surf. Sci.*, **34** (1973), 289.

(上接第 631 页)

的讨论而确立的, 但它们对任意非周期的图象的分析也是适用的。本讲详尽地讨论正弦光栅的衍射, 意义就在于此。作为这些基本概念的一种实际应用, 下一讲将讨论阿贝成象原理与

相衬显微镜。为使理论分析更加完善, 第五讲再讨论任意屏函数的夫琅和费衍射, 了解怎样对物信息实现频谱分析。