

И. В. КОМПАНЕЕЦ, аспирант УИПА (г. Харьков)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНДЕНСАТОРНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ

Проведено аналіз конденсаторних методів вимірювання контактної різниці потенціалів. Розглянута можливість їх застосування в якості експрес-метода контролю фізико-хімічного стану поверхні конструкційних матеріалів. Доведена доцільність визначення більш ефективних засобів мінімізації похибок та розробки методики метрологічного забезпечення метода віброуючого конденсатора.

Analysis of condenser methods to measure contact potential difference has been performed. Possibility of application of such methods as an express method to monitor physico-chemical condition of surfaces of structural materials has been considered. Expedience of determination of most efficient error minimization techniques and development of procedure of metrological assurance of vibrating capacitor method has been demonstrated.

Введение

Работа выхода электрона является одной из важнейших энергетических характеристик материалов, высокочувствительной к различным факторам, определяющим структурное и физико-химическое состояние поверхности твердых тел.

Различные явления на поверхности, в особенности процессы механической обработки, деформации, окисления, облучения могут быть исследованы качественно и количественно по изменению работы выхода или с помощью измерений контактной разности потенциалов (КРП) [1]. При электрическом контакте двух разнородных тел с работами выхода $\Phi_1 < \Phi_2$ (см. рис. 1) происходит перемещение части валентных электронов из тела с меньшей работой выхода, соответственно, с более высоким уровнем Ферми ε_{F1} в тело с большей работой выхода и соответственно с меньшим уровнем Ферми ε_{F2} , что приводит к уравниванию уровней Ферми двух тел. При этом между телами устанавливается разность потенциалов $U_{крп}$ равная:

$$U_{крп} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{e}, \quad (1)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; Φ_1 и Φ_2 – работа выхода эталонного и исследуемого образцов.

Для определения КРП широко используется конденсаторный метод [2]. Его принцип может быть описан при помощи установки, предложенной Кельвином (см. рис. 2). Две пластины $П_1$ и $П_2$, расположенные в непосредственной близости друг от друга, образуют плоский конденсатор. На пластинах появляется заряд равный:

$$q = C \cdot U_{крп}, \quad (2)$$

где C – емкость, образованная поверхностями пластин Π_1 и Π_2 ; $U_{крп}$ – контактная разность потенциалов между электродами, может принимать как положительное так и отрицательное значение.

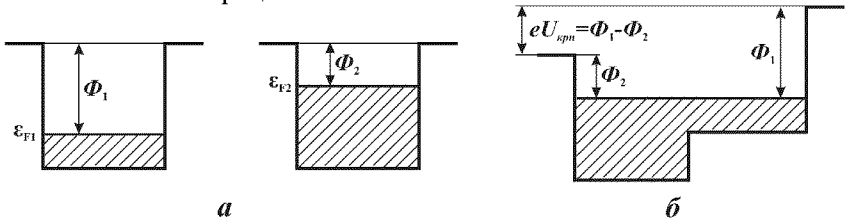


Рис. 1. Энергетическая диаграмма разнородных материалов до (а) и после (б) контакта

При помощи регулятора источника питания E подбирается напряжение U_k точно компенсирующее $U_{крп}$, что контролируется нулевым отклонением стрелки электрометра \mathcal{E} . Таким образом скомпенсированное $U_{крп}$ будет равно $-U_k$.

Особый интерес к методу объясняется тем, что он является бесконтактным, неразрушающим и применим в широком диапазоне температур и давлений остаточных газов.

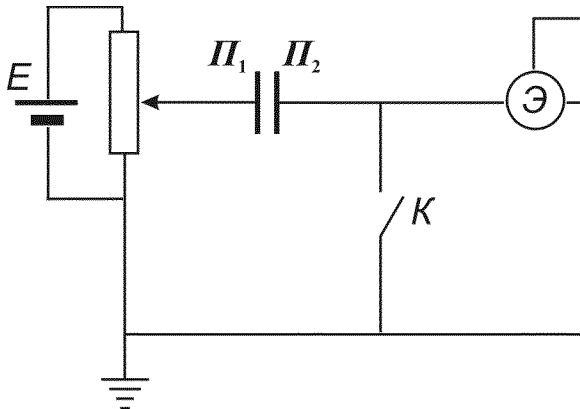


Рис. 2. Схематическое изображение конденсаторного метода.

Постановка задачи

В настоящее время существует множество модификаций установки Кельвина, целью которых было сделать метод точным и удобным в эксплуатации.

В работе ставится задача рассмотреть физические основы двух наиболее распространенных принципов реализации конденсаторных методов, а так же провести их сравнительный анализ.

Основная часть

Широко используется два основных конденсаторных метода, которые отличаются способом детектирования зарядов между эталонным и исследуемым образцами. Это метод вибрирующего конденсатора и метод поперечно-зондирования (ПЗ) или сканирующий метод [3].

Метод вибрирующего конденсатора предложенный Зисманом [4] положен в основу большого количества опытно-экспериментальных устройств для измерения КРП. В этом методе две параллельно расположенные друг к другу плоскости электродов (измерительного зонда и исследуемого образца) образуют конденсатор. Один из электродов, как правило измерительный зонд, колеблется в непосредственной близости от фиксированно закрепленного исследуемого образца (см. рис. 3), модулируя тем самым заряд на электродах, в результате чего и появляется электрический ток в цепи.

Если перемещение измерительного зонда синусоидальное то межэлектродное расстояние изменяется по закону:

$$d(t) = d_0 + a \cdot \sin(\omega t), \quad (3)$$

где d_0 – межэлектродное расстояние в состоянии покоя; a – амплитуда колебаний измерительного зонда; ω – циклическая частота.

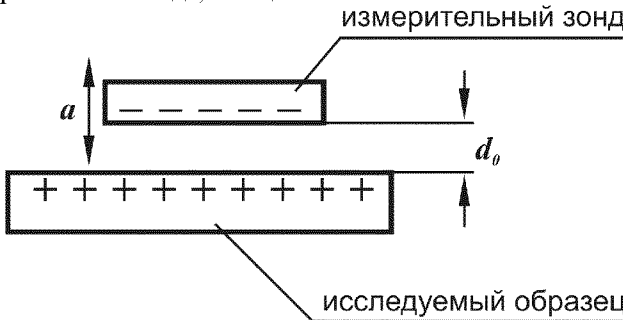


Рис. 3. Метод вибрирующего конденсатора.

Вертикальная вибрация вызывающая периодическое изменение емкости между электродами, описывается уравнением:

$$C(t) = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d(t)}, \quad (4)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ – электрическая постоянная; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды; S – общая площадь соприкосновения электродов. Модуляция емкости приводит к модуляции заряда на электродах, в результате чего в цепи появляется сигнал переменного тока $I(t)$, который равен:

$$I(t) = \frac{\partial q}{\partial t}. \quad (5)$$

Объединив уравнения (2) и (5) получаем:

$$I(t) = \frac{\partial(C \cdot U_{крп})}{\partial t}. \quad (6)$$

Продифференцировав уравнение (6) получим:

$$I(t) = C \cdot \frac{\partial U_{крп}}{\partial t} + U_{крп} \cdot \frac{\partial C}{\partial t}. \quad (7)$$

Подставив уравнения (1), (3), (4) в (7), получим:

$$I(t) = \left(\frac{\Phi_1 - \Phi_2}{e} \right) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d_0 + a \cdot \sin(\omega t)} \right) \quad (8)$$

или

$$I(t) = - \frac{(\Phi_1 - \Phi_2) \cdot \omega \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S \cdot a \cdot \cos(\omega t)}{e \cdot (d_0 + a \cdot \sin(\omega t))^2}. \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает процесс генерации сигнала вибрирующего конденсатора. Видно, что генерируемый ток зависит от геометрических параметров (межэлектродного расстояния, величины общей контактируемой площади электродов, амплитуды и частоты колебаний электрода) определяемых конструктивными особенностями измерителей КРП, а так же физико-химических свойств самих электродов и условий проведения измерений (среды, давления окружающей среды, температуры, освещения и др.), которые вносят вклад в работу выхода и диэлектрическую проницаемость среды.

Однако, уравнение (9) не учитывает влияние паразитных переменных токов, возникающих в результате модуляции паразитной емкости между электродами конденсатора и окружающими электродами [5].

Метод ПЗ основан на генерации сигнала в результате перемещения эталонного электрода параллельно поверхности исследуемого образца или же перемещения поверхности исследуемого образца параллельно эталонному электроду. Так если работа выхода исследуемой поверхности образца будет не одинаковой, то и значения КРП будет также изменяться. Рассмотрим этот метод на примере образца имеющего в своем составе два разнородных материала с работами выхода Φ_1 и Φ_2 (см. рис. 4).

Когда измерительный зонд проходит границу раздела между двумя разнородными материалами, значение работы выхода поверхности исследуемых образцов различное и следовательно $U_{крп}$ изменяется. Если работа выхода измерительного зонда Φ_3 , тогда значение КРП между измерительным зондом и разнородными материалами с работой выхода Φ_1 и Φ_2 равна:

$$U_{крп1} = \frac{\Phi_3 - \Phi_1}{e}, \quad (10)$$

$$U_{крп2} = \frac{\Phi_3 - \Phi_2}{e}. \quad (11)$$

С учетом, того что емкость остается постоянной вследствие постоянно-го межэлектродного расстояния, уравнение (7) может быть преобразовано:

$$I(t) = C \cdot \frac{\partial U_{кpn}}{\partial t}. \quad (12)$$

Отметим, что скорость изменения КРП зависит от относительной скорости перемещения между зондом и поверхностями образцов, и может быть выражена как:

$$\frac{\partial U_{кpn}}{\partial t} = \frac{U_{кpn1} - U_{кpn2}}{\Delta t}. \quad (13)$$

Подставив уравнения (10), (11) в (13) получим:

$$\frac{\partial U_{кpn}}{\partial t} = \frac{1}{e} \cdot \left(\frac{(\Phi_3 - \Phi_1) - (\Phi_3 - \Phi_2)}{\Delta t} \right), \quad (14)$$

тогда

$$\frac{\partial U_{кpn}}{\partial t} = \frac{(\Phi_2 - \Phi_1)}{e \cdot \Delta t}. \quad (15)$$

А результирующий ток в измерительном зонде будет равен:

$$I(t) = C \cdot \frac{(\Phi_2 - \Phi_1)}{e \cdot \Delta t}. \quad (16)$$

В отличие от метода вибрирующего конденсатора емкость остается постоянной на протяжении всего периода измерений. Изменение величины КРП определяется изменением работы выхода образца, а скорость измерения значений определяется скоростью перемещения зонда над поверхностью исследуемого образца. В результате отсутствия вибрирующих элементов метод менее критичен к появлению паразитных емкостей.

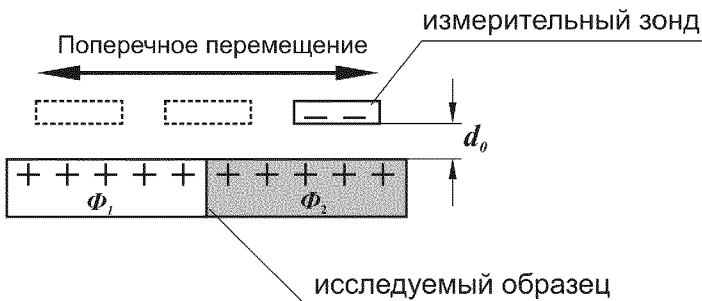


Рис. 4. Метод поперечного зондирования.

Но, как и в случае вибрирующего конденсатора разрешающая способность определяется диаметром эталонного электрода, при этом в силу особенностей метода, измерение среднего значения КРП всего образца провести невозможно.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики двух методов.

Таблица 1.

Характеристики	Метод вибрирующего конденсатора	Метод поперечного зондирования
Метод детектирования заряда	Колебательное движения одного электрода перпендикулярно плоскости другого	Перемещение одного электрода параллельно плоскости другого
Разрешающая способность определяется	Определяется диаметром измерительного зонда	Определяется диаметром измерительного зонда
Возможность локального измерения КРП на поверхности материалов	Да	Ограниченно возможностью позиционирования измерительного зонда
Измерение среднего значения КРП поверхности исследуемого образца	Да	Нет
Возможность измерения в жидких средах	Нет данных	Да
Возможность использования в газообразных средах	Да	Да
Возможность использования в вакууме	Да	Да

Выводы

Метод поперечного зондирования является достаточно ограниченным в своем применении, т. к. измеряет только изменение КРП и трудоемок в позиционировании образцов. Поэтому метод ПЗ является достаточно неудобным в качестве экспресс-метода контроля конструкционных материалов после различных внешних воздействий. Несмотря на это отметим, что известны случаи успешного использования метода для мониторинга износа деталей устройств [6] и оценки смазочных материалов [7].

Более пригодным для оценки физико-химического состояния конструкционных материалов является метод вибрирующего конденсатора, который может производить позиционирование измерительного зонда над поверхностью образцов и позволяет измерять не только среднее значение КРП всей площади образца, но и производить измерения КРП на отдельных участках образца [8-11]. Существенным же недостатком метода вибрирующего конденсатора по сравнению с методом поперечного зондирования, является то что в отдельных случаях могут быть достаточно большие погрешности, вы-

званные электромагнитными наводками в результате удаленного размещения измерительного зонда от входа предварительного усилителя. Кроме того вибрация эталонного электрода вызывает дополнительную модуляцию паразитных емкостей с окружающими электродами. Все эти проблемы требуют дополнительных конструкционных решений, которые позволят свести к минимуму описанные недостатки.

В дальнейшем предполагается провести исследование для определения наиболее эффективных способов минимизации погрешностей, а также разработать методику метрологического обеспечения метода вибрирующего конденсатора.

Выражаю благодарность Шкилько А. М. за полезное обсуждение результатов работы и ценные замечания, а также В. В. Борисову за помощь в наладке измерителя КРП и проведении экспериментов.

Список литературы: 1. *Ривьерс Х.* Работа выхода. Измерения и результаты / *Х. Ривьерс* // Поверхностные свойства твердых тел: сборник статей; под ред. *М. Грина*. – М.: Мир, 1972. – 432 с. 2. *Царев Б.М.* Контактная разность потенциалов / *Царев Б. М.* – М.: ГИТТЛ, 1955. – 280 с. 3. *Baumgärtner H.* Micro Kelvin probe for local work-function measurements / *H. Baumgärtner, H. D. Liess* // *Rev. Sci. Instrum.* – 1988. – №59(9). – P. 802-805. 4. *Zisman W.A.* A new method of measuring contact potential differences in Metals / *W.A. Zisman* // *Rev. Sci. Instrum.* – 1932. – №3. – P. 367-370. 5. *Де Бур* Анализ и усовершенствование метода Кельвина для измерения разностей работ выхода / *Де Бур, Круземейер, Ясперс* // Приборы для научных исследований. – 1979. – №8. – С. 74-81. 6. Patent 5974869 Unite States, G01R 027/26. Non-vibrating capacitance probe for wear monitoring / *Danylyuk Steven, Zharin Anatoly, Zanoria Elmer et al.*; Assignee Georgia Tech Research Corporation. – Appl. No 08/971101, Filed Nov. 14, 1997; Issued Nov. 2, 1999. 7. *Korach C. S.* Measurement of perfluoropolyether lubricant thickness on a magnetic disk surface / *C.S. Korach, J. Streater, S. Danylyuk* // *Applied Physics Letters*. – 2001. – Vol. 79, №5. – P. 698. 8. *Арсламбеков В.А.* Установка для измерения топографии контактной разности потенциалов / *В.А. Арсламбеков, В.Я. Смуценко, В.С. Мияйлык*. – М.: ВИНТИ, 1972. – 11 с. 9. *Крячко В.В.* Бесконтактный метод исследования зарядового состояния границы раздела полупроводник-диэлектрик / *В. В. Крячко, М. Н. Левин, А. В. Татаринцев и др.* // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, №10. – с. 128-133. 10. *Компанец І. В.* Устройство для измерения контактной разности потенциалов / *И.В. Компанец, В.В. Борисов, А.М. Шкилько* // 1-я международная конференция «Электронная компьютерная база. Состояние и перспективы развития»: сб. научных трудов. – Судак: ХНУРЭ, 2008. – Т. 3. – С. 141-143. 11. Патент на корисну модель 39395 Україна, МПК G01R 29/12. Пристрій для вимірювання поверхневого потенціалу / *Компанієць І. В., Шкілько А. М., Борисов В. В.*; власник Українська інженерно-педагогічна академія. – № u200811428; дата заявки 22.09.2008; дата публік. 25.02.2009, Бюл. №4.

Поступила в редколлегию 03.07.09