

Следует учитывать, что вклад в соотношение сигнал/шум будут вносить как постоянные погрешности (собственные шумы, различные электромагнитные наводки и др.), не зависящие от точки компенсации, так и зависящие от потенциала компенсации составляющие погрешность от паразитных КРП [1]. Тогда минимальное значение U_n (рисунок 2) до которого можно скомпенсировать выходной сигнал и, следовательно, погрешность измерения КРП будет являться функцией от потенциала компенсации.

Для экспериментального уточнения зависимости минимальной погрешности от потенциала компенсации необходимо построить функцию $U_n = f(U_{\text{комп}})$. Это удобно сделать с помощью дополнительного источника постоянного потенциала, имитирующего КРП (рисунок 1). При этом для исключения влияния паразитных электромагнитных наводок, измерение U_n необходимо осуществлять на частоте модуляции емкости динамического конденсатора.

Результаты моделирования для измерительной установки КРП с коэффициентом преобразования совместно с коэффициентом усиления ($KA = 200$) приведены на рисунке 3. Минимальная погрешность составила 1 мВ при потенциале компенсации 100 мВ.

Настоящая методика может быть использована непосредственно при построении измерительных установок КРП, когда требуется проработка схемотехнического дизайна и взаимного расположения элементов конструкции зонда. В частности, по известной зависимости $U_n = f(U_{\text{комп}})$ может быть уменьшено влияние

паразитных динамических емкостей и последовательное устранение электромагнитных наводок. Также можно зафиксировать потенциал компенсации в области минимальной погрешности и компенсировать выходной сигнал с помощью дополнительного источника постоянного потенциала.

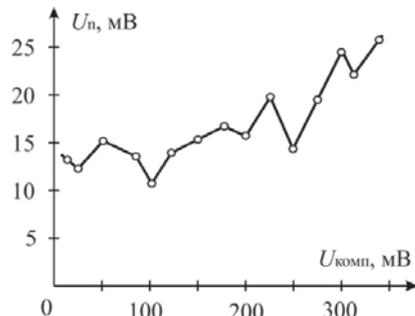


Рисунок 3 – Зависимость некомпенсированного сигнала от потенциала компенсации

С другой стороны, зная параметры линейной зависимости выходного сигнала от потенциала компенсации в режиме «большого», когда соотношение сигнал/шум высоко, можно методом линейной аппроксимации вычислить нулевую амплитуду сигнала. В этом случае погрешность от неполной компенсации может быть полностью исключена и, следовательно, исключена область неопределенности, имеющаяся в традиционных установках для измерения КРП по методу Кельвина-Зисмана.

1. Жарин, А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. – Мн.: Бестпринт, 1996. – С. 235.

УДК 681.2.08

УПРАВЛЕНИЕ РАССТОЯНИЕМ МЕЖДУ ОБКЛАДКАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА В МЕТОДЕ КЕЛЬВИНА–ЗИСМАНА

Пантелеев К.В., Тявловский А.К., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Динамический конденсатор Кельвина–Зисмана, является одним из наиболее чувствительных методов измерения контактной разности потенциалов (КРП) между поверхностями эталонного и измеряемого образца. Хорошо известно, что на КРП оказывают существенное влияние изменения химического и фазового состава, атомарные дефекты, деформационные процессы в материале поверхностного слоя, десорбция и адсорбция атомов и молекул из окружающей среды. Поэтому измерения пространственного распределения поверхностного потенциала находят широкое применение в практике фундаментальных и прикладных исследований.

Пространственное разрешение метода в основном ограничивается размером эталонной по-

верхности зонда. Как правило, ее поперечные размеры не превышают 1 мм. Емкость динамического конденсатора при этом мала и, соответственно, мал ток в цепи. Из-за влияния ряда паразитных факторов, уменьшается и чувствительность измерений. В тоже время, погрешность измерения КРП методом Кельвина-Зисмана сильно зависит от расстояния между поверхностями зонда и измеряемым образцом [1]. Это связано с перераспределением соотношения сигнал/шум. Для компенсации данного эффекта расстояние между обкладками динамического конденсатора должно быть минимально допустимым и неизменным во всем цикле сканирования поверхности.

Известны несколько способов управления расстоянием между обкладками измерительного динамического конденсатора [2]. Как правило, они предусматривают использование дополнительных контрольно-измерительных приборов. Это накладывает соответствующие ограничения на метод. В настоящей работе на основе метода цифрового измерения КРП [3], предложен новый способ управления расстоянием.

Ток в цепи динамического конденсатора описывается уравнением

$$i(t) = (U_{\text{КРП}} + U_{\text{комп}}) \frac{dC(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $U_{\text{КРП}}$ – КРП между поверхностями зонда и измеряемого образца, $U_{\text{комп}}$ – потенциал компенсации, C – электрическая емкость конденсатора.

Модуляция расстояния между обкладками динамического конденсатора описывается гармоническим законом

$$d(t) = d_o + d_m \cos(\omega t), \quad (2)$$

где d_o – расстояние между обкладками динамического конденсатора; d_m – амплитуда вибрации; ω – циклическая частота вибрации,

Тогда временная зависимость электрической емкости динамического конденсатора будет описываться выражением

$$C(t) = \frac{\varepsilon S}{d(t)} = \frac{\varepsilon S}{d_o + d_m \cos(\omega t)}, \quad (3)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, S – площадь эталонной поверхности динамического конденсатора.

С учетом (3) выражение (1) примет вид

$$i(t) = (U_{\text{КРП}} + U_{\text{комп}}) \frac{\varepsilon \omega S d_m \sin(\omega t)}{(d_o + d_m \cos(\omega t))^2}. \quad (4)$$

Как отмечалось ранее, динамический конденсатор подвержен влиянию ряда паразитных факторов. Наиболее существенно и практически не устранимо влияние паразитных динамических конденсаторов, образованных вибрирующим зондом и конструктивными элементами измерительной головки. В этом случае паразитный сигнал имеет ту же частоту ω и близкую по порядку величины амплитуду U_m , что и полезный сигнал. Тогда потенциал, приложенный к динамическому конденсатору для компенсации КРП, будет определяться выражением

$$U(t) = U_{\text{комп}} + U_m \sin(\omega t). \quad (5)$$

С учетом (5) выражение (4) примет вид

$$i(t) = (U_{\text{КРП}} + U_{\text{комп}}) \frac{\varepsilon \omega S \sin(\omega t)}{(d_o + d_m \cos(\omega t))^2} + \quad (6)$$

$$+ (U_{\text{комп}} + U_{mj}) \varepsilon \omega S \frac{\partial}{\partial(t)} \left(\frac{\varepsilon S \sin(\omega t)}{d_{oj} + d_m \cos(\omega t)} \right),$$

где индекс j относится к элементам конструкции измерительной головки, U_{mj} – паразитная КРП; d_{oj} – расстояние между эталонной поверхностью динамического конденсатора и j -им элементом.

Полагая, что d_o и $d_{oj} \gg d_m$, выражение (6) после дифференцирования может быть упрощено до вида

$$i(t) = (U_{\text{комп}} + U_{\text{КРП}}) \varepsilon \omega S \frac{d_m}{d_o^2} + (U_{\text{комп}} + U_{mj}) \varepsilon \omega S \frac{d_m}{d_{oj}^2}. \quad (7)$$

В выражении (7) первое и второе слагаемое описывают амплитуды полезного и суммарного паразитного сигнала с динамического конденсатора, соответственно. Можно показать, что возникающая при изменении расстояния между поверхностями зонда и измеряемого образца дополнительная погрешность связана с перераспределением соотношения полезного и суммарного паразитного сигналов.

В соответствии с выражением (7), изменение расстояния d_o приводит к соответствующему изменению амплитуды выходного сигнала. Эта зависимость положена в основу предлагаемого способа управления расстоянием между зондом и поверхностью измеряемого образца в методе цифрового измерения КРП.

Цифровой метод измерения КРП (рисунок 1) подробно описан в работе [3]. Он основан на математическом вычислении параметров компенсационной зависимости измерительного сигнала от потенциала компенсации при поочередном определении амплитуд сигнала A_1 и A_2 при заданных значениях потенциалов компенсации B_1 и B_2 , соответственно. Далее КРП рассчитывается из уравнения прямой, проходящей через две несовпадающие точки $A_1(B_1)$ и $A_2(B_2)$.

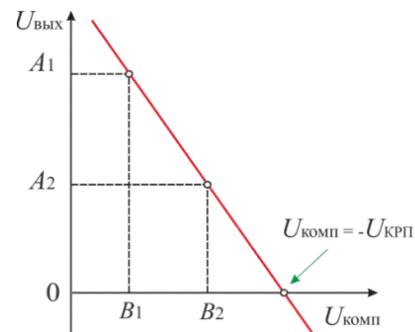


Рисунок 1 – Принцип цифрового измерения контактной разности потенциалов по методу Кельвина–Зисмана.

При изменении расстояния $\Delta d = d_{0\alpha} - d_{0\beta}$ (рисунок 2) между поверхностями эталонного и измеряемого образца (рисунок 2) изменяются амплитуды измерительного сигнала A_1 и A_2 . При этом КРП и, следовательно, потенциал компенсации остаются неизменными.

В этом случае разность между тангенсами углов наклона зависимости измерительного сигнала от потенциала компенсации находится в обратной зависимости от изменения расстояния Δd между обкладками динамического конденсатора:

$$tg\alpha - tg\beta = \varepsilon\omega S d_m \left(\frac{1}{d_{0\alpha}^2} - \frac{1}{d_{0\beta}^2} \right), \quad (8)$$

где α и β – углы наклона компенсационной зависимости от расстояния между обкладками конденсатора $d_{0\alpha}$ и $d_{0\beta}$, соответственно.

В цифровом методе измерения КРП изменение расстояния Δd рассчитывается одновременно со значением КРП в едином измерительном цикле.

Предложенный способ позволяет измерять геометрический профиль поверхности непосредственно в процессе сканирования потенциала поверхности, а также осуществлять автоподстройку расстояния d_0 и автоподвод измерительного зонда к поверхности измеряемого образца.

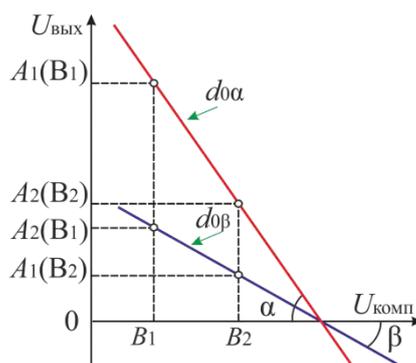


Рисунок 2 – Принцип цифрового определения изменения расстояния между поверхностями эталонного и измеряемого образцов по параметрам компенсационной зависимости

1. Wicinski, M. Lateral resolution in scanning Kelvin probe microscopy / M. Wicinski, W. Burgstaller, A. W. Hassel // Corrosion Science. – 2016. – Vol. 104. – P. 1–8.
2. Blott, B.H. A two frequency vibrating capacitor method for contact potential difference measurement / B.H. Blott, T.J. Lee // Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1969. – Vol. 2, № 9. – P. 785–788.
3. Пантелеев К.В. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А. К. Тьяловский, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.

УДК 681.2.08

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЦИФРОВЫМ ЗОНДОМ КЕЛЬВИНА

Пантелеев К.В.¹, Дубаневич А.В.¹, Жарин А.Л.¹, Кравцевич А.В.², Шашура Л.И.²

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²Гродненский филиал «Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения» ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси»

Гродно, Республика Беларусь

Традиционно, в случае высокоомных материалов, зонд Кельвина применяют для измерения эффективной поверхностной плотности заряда. Этот параметр является интегральным, т.е. содержащим информацию о суммарном поверхностном и объемном потенциале (заряде). На практике особый интерес представляет их разграничение, которое при отсутствии априорной информации о природе потенциала провести крайне трудно.

Дополнительную информацию о том является ли потенциал поверхностным или объемным можно получить в случае контролируемой статической электризации.

В общем случае механизмы статической электризации могут быть связаны с непосредственным осаждением или внедрением в объем поверхностного слоя заряженных частиц при воздействии ионными пучками и/или электрическими разрядами. Другим механизмом является внешнее и внутреннее трение, например, при деформации твердого тела. Естественный технический характер последних вызывает самостоятельный практический интерес, например, при производстве и эксплуатации электретов, изоляторов аэрокосмической аппаратуры, композитов на основе полимеров для пищевой промышленности и т.д.