

УДК 681.2.08

Построение измерителей контактной разности потенциалов

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

Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Беларусь

Поступила 15.02.2016

Принята к печати 22.04.2016

Измерители контактной разности потенциалов отличаются большим многообразием и изготавливаются в основном в лабораторных условиях для конкретных экспериментальных задач. Как правило, они состоят из серийно выпускаемых измерительных приборов и поэтому обладают рядом недостатков, например большими габаритами, сложностью и высокой стоимостью, низкими чувствительностью, быстродействием, помехозащищенностью и др. Целью работы являлось описание базовых подходов к разработке и конструированию малогабаритных, полностью сформированных измерителей контактной разности потенциалов, обеспечивающих высокую чувствительность, быстродействие и помехозащищенность. Для возбуждения механических колебаний эталонного образца применен электромеханический модулятор, в котором для обеспечения высокой амплитудно-фазовой стабильности используется модернизированный генератор с мостом Вина, что обеспечивает захват и поддержание частоты механического резонансного колебания без традиционно используемого датчика колебаний. Предусилитель выполнен на базе операционных усилителей с фемтоамперными входными токами. Питание предусилителя выполнено с «плавающей землей», что позволяет сохранить соотношения потенциалов компонентов зонда постоянными при изменении напряжения компенсации в широком диапазоне. Фазовый детектор-интегратор выполнен на основе противофазно коммутируемых с частотой модуляции контактной разности потенциалов электронных ключей и интегратора. Двухполупериодное фазовое детектирование позволяет в значительной степени повысить чувствительность. Для уменьшения влияния электромагнитных наводок и шумов, устранения микрофонного эффекта предварительный усилитель вместе с эталонным образцом смонтирован на гибкой печатной плате, отдельно от других электронных узлов.

Ключевые слова: контактная разность потенциалов, зонд Кельвина, измеритель КРП, работа выхода электрона.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: nil_pt@bntu.by

Address for correspondence:

Pantsialeveu K.U.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: nil_pt@bntu.by

Для цитирования:

Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Жарин А.Л.
Построение измерителей контактной разности потенциалов.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 1. – С. 7–15.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

For citation:

Pantsialeveu K.U., Mikitsevich U.A., Zharin A.L.
[Design of the contact potentials difference probes].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 1, pp. 7–15 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

Введение

Измерители контактной разности потенциалов (КРП) находят широкое применение как при решении научно-исследовательских задач [1–3], так и в промышленности при оценке состояния поверхности материалов различной физической природы [4–6], качества очистки их поверхностей [7, 8], защитных и эксплуатационных свойств тонких пленок и покрытий [9, 10] и др. [11], в том числе для изделий микро- и нанотехнологии [12].

Методы измерения КРП (метод Кельвина–Зисмана) в случае металлов, сплавов и полупроводников основаны на регистрации разности работ выхода электрона (РВЭ) между измеряемой и эталонной поверхностями.

РВЭ поверхности является чувствительным параметром, позволяющим оценивать изменения химического состава, кристаллографической ориентации, дефектов кристаллической решетки (деформаций, дислокаций, включений инородных атомов и др.). Чувствительность методов измерения РВЭ весьма высока. Так, например, монослой адсорбированных частиц может вызвать изменение поверхностного потенциала на величину порядка 1 В, а инструментальная чувствительность методов измерения РВЭ составляет величину около 0,1–1 мВ [3, 13].

Анализ литературных данных [1–13] показал, что измерители КРП, как правило, представляют собой лабораторную установку, состоящую из серийно выпускаемых измерительных приборов (измерительных усилителей, фазовых детекторов (Lock-in) и др.), поэтому они обладают рядом недостатков, к числу которых можно отнести большие габариты, высокую стоимость, а также сравнительно большое время измерений, сложность выполнения многократных измерений для улучшения соотношения сигнал/шум, низкую чувствительность и др.

Как показала многолетняя практика авторов (начиная с 1975 г.) использования метода КРП для различных экспериментальных задач, включая контроль процессов трения и картографирование распределения РВЭ поверхностей, использование современной электронной базы позволяет изготавливать прецизионные малогабаритные измерители КРП, на выходе которых постоянно поддерживается напряжение равное КРП. Благодаря малым габаритам и оптимизации конструкции измерители имеют высокое быстродействие и чувствительность измерений, а также

повышенную помехозащищенность в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов (механических, электромагнитных и др.). Они могут быть встроены практически в любые специализированные измерительные установки.

Целью работы являлось описание базовых подходов к разработке и конструированию малогабаритных, полностью сформированных измерителей КРП, обеспечивающих высокую чувствительность, быстродействие и помехозащищенность.

Измеритель контактной разности потенциалов

Измеритель КРП представляет собой электрометр с динамическим конденсатором, отличительной особенностью которого являются существенно уменьшенные размеры и емкость динамического конденсатора. Если в обычных электрометрах с динамическим конденсатором площадь пластин порядка нескольких квадратных сантиметров, то в случае измерителей КРП практический интерес представляют размеры порядка 0,1–5 мм², например для использования в сканирующих системах (в сканирующем зонде Кельвина, *Scanning Kelvin Probe* [9, 14]), а также в системах контроля технологических процессов, например при трении [15]. Поэтому сигналы с конденсатора измерителя КРП чрезвычайно малы, порядка минимально разрешимых с точки зрения современной аналоговой электроники. Кроме того, динамический конденсатор для электрометров представляет собой закрытую, полностью экранированную систему, что в случае измерений КРП сделать практически невозможно. Поэтому к измерителям КРП предъявляются жесткие требования как с точки зрения собственных шумов и защиты от внешних наводок, так и с точки зрения тщательной проработки механического и схемотехнического дизайна [16].

Структурная схема измерителя контактной разности потенциалов

На рисунке 1 показана структурная схема измерителя КРП. Входная цепь состоит из конденсатора, образованного поверхностями измерительного электрода M_1 (эталонный образец), заземленного контролируемого образца M_2 и входного высокоомного предусилителя. Под действием электромеханического модулятора эталонный образец вибрирует на частоте собственного ме-

ханического резонанса относительно образца M_2 , т.е. M_1 и M_2 образуют динамический конденсатор.

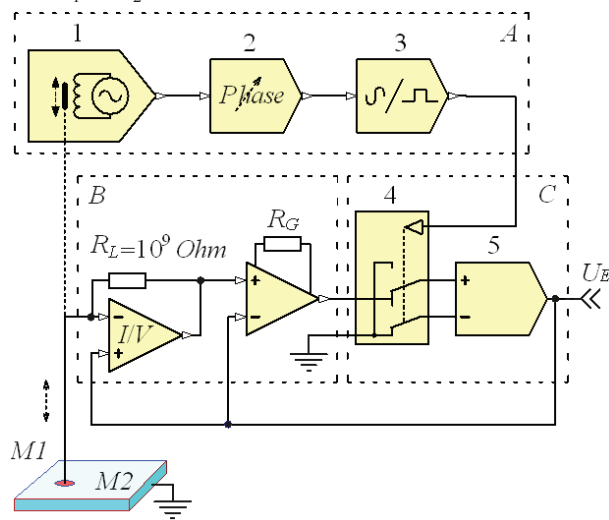


Рисунок 1 – Структурная схема измерителя контактной разности потенциалов: M_1, M_2 – поверхности зонда и контролируемого образца соответственно; A – блок-схема модулятора (1 – вибратор, 2 – фазосдвигатель, 3 – формирователь сигнала); B – блок-схема предусилителя; C – блок-схема фазового детектора-интегратора (4 – электронный ключ, интегратор); U_E – сигнал контактной разности потенциалов

Figure 1 – Structure of contact potential difference probes: M_1, M_2 – surfaces of the probe and sample, respectively; A – flowchart of the modulator (1 – vibrator, 2 – phase shifter, 3 – converter); B – flowchart of the preamplifier; C – flowchart of the phase detector-integrator (Lock-In, 4 – analog switch, 5 – integrator); U_E – contact potential difference

Емкость конденсатора при периодическом изменении расстояния между эталонным и измеряемым образцами также периодически изменяется со временем. При достаточно большом сопротивлении резистора R_L заряд не будет успевать полностью стекать с обкладок конденсатора за период изменения емкости, что вызовет появление на инвертирующем входе предусилителя переменного потенциала. Усиленный сигнал с предварительного усилителя поступает на вход фазового детектора. Далее выпрямленное напряжение через интегратор подается на неинвертирующий вход предусилителя для компенсации КРП между эталонным образцом и измеряемой поверхностью, тем самым обеспечивается замкнутая цепь автоматической автокомпенсации измеряемой величины.

При переходе потенциала компенсации U_K через значение, равное КРП, фаза переменного

сигнала с частотой ω изменяется на 180° вследствие изменения полярности пластин конденсатора. Фазочувствительный детектор настроен таким образом, чтобы его выходное напряжение понижалось при фазе переменного сигнала, соответствующей превышению потенциалом компенсации значения КРП, и возрастало в обратном случае. При равенстве потенциала компенсации U_K величине КРП U_E заряд на измерительном динамическом конденсаторе будет скомпенсирован. В этом случае выходной сигнал на выходе дифференциального усилителя отсутствует, а значение потенциала компенсации поддерживается интегратором. При нарушении равенства $U_K = U_E$ конденсатор зарядится и на нем появится переменный потенциал, в зависимости от фазы которого фазочувствительный детектор формирует потенциал компенсации таким образом, чтобы равенство потенциала компенсации величине КРП восстановилось.

Таким образом, измеритель непрерывно отслеживает изменение КРП между эталонным и измеряемым образцами по фазе, значение КРП может быть измерено или записано с помощью соответствующего внешнего регистратора.

Модулятор

Для возбуждения механических колебаний эталонного образца возможно использование механических, электромагнитных, электростатических и пьезоэлектрических модуляторов [17]. Электростатические и пьезоэлектрические модуляторы не получили широкого распространения при измерениях КРП. Их недостатком является высокое переменное напряжение, требующееся для их работы, что создает значительный уровень помех, а также низкая механическая прочность, что затрудняет их использование в условиях повышенных вибраций. Механические модуляторы используются редко вследствие сложности конструкции и трудности получения опорного сигнала при использовании фазового детектирования. Однако такие модуляторы не создают паразитных наводок на вход измерителя КРП и перспективны при прецизионных измерениях. Исходя из вышесказанного, при построении измерителя КРП использован электромеханический модулятор. Структурная схема модулятора показана на рисунке 2.

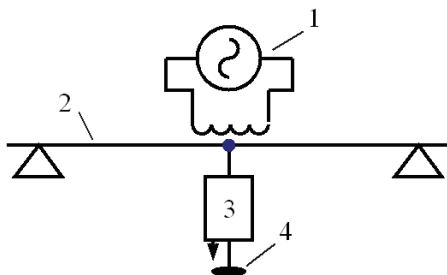


Рисунок 2 – Структурная схема модулятора: 1 – вибратор; 2 – упругая пластина; 3 – предусилитель; 4 – зонд

Figure 2 – Structure of the modulator: 1 – vibrator; 2 – elastic plate; 3 – preamplifier; 4 – probe

Для получения достаточно большой амплитуды механических колебаний эталонного образца модулятор необходимо возбуждать на частоте собственного механического резонанса. Однако в любой колебательной системе вблизи резонанса наблюдается резкое изменение фазы между возбуждающими и механическими колебаниями. Поскольку измеритель является системой с фазовой автокомпенсацией измерительной величины, требуется высокая амплитудно-фазовая стабильность модулятора. Для обеспечения стабильности была разработана схема модулятора, показанная на рисунке 3. Традиционные схемы модуляторов используют в обратной связи датчик колебаний для захвата и поддержания частоты механического резонанса упругой пластины, однако использование датчика колебаний усложняет модулятор.

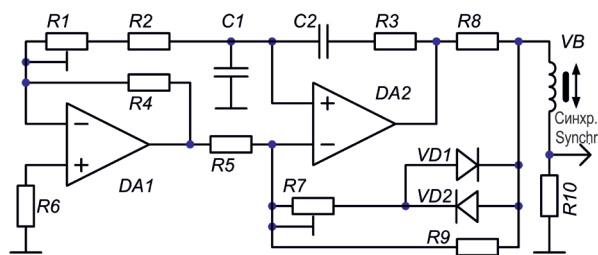


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема модулятора

Figure 3 – Schematic of the modulator

В представленной схеме в качестве задающего генератора использован модернизированный генератор с мостом Вина на DA_2 . Мост Вина включает R_1 , R_2 , C_1 , C_2 и R_3 , а также DA_1 . Использование дополнительного операционного усилителя (ОУ) DA_1 позволило расширить диапазон предварительной подстройки частоты колебаний

генератора Вина с помощью одного подстроечного резистора R_1 при соблюдении баланса моста. Амплитуда колебаний генератора стабилизируется диодами VD_1 и VD_2 , а ее величина устанавливается подстроечным резистором R_7 . Захват и поддержание резонансной частоты механических колебаний упругой пластины осуществляется без использования датчика колебаний. На частоте механического резонанса резко уменьшается ток через катушку VB и, соответственно, через датчик тока R_8 . Учитывая, что R_8 также входит в цепь стабилизации амплитуды колебаний генератора Вина, при приближении его частоты к механическому резонансу пластины происходит захват частоты резонанса и ее дальнейшее поддержание.

Предварительный усилитель

Учитывая предельно малые сигналы с измерительного динамического конденсатора, к предусилителю предъявляются жесткие требования с точки зрения как электронного дизайна, так и конструктива. В последнее время на рынке появились ОУ с входными токами около единиц фемтоампер, что значительно облегчает построение схем предусилителей, но требует тщательной проработки конструкции и использования новых материалов для печатных плат с повышенным объемным и поверхностным сопротивлением (например, ламинатов на основе фторопласта, армированного керамикой).

Предусилитель измерителя КРП (рисунок 4) выполнен по схеме преобразователя ток-напряжение на ОУ DA_1 и высокоомного резистора R_2 (10^9 Ом). Применение во входном каскаде измерителя ОУ позволяет отказаться от традиционного разделительного конденсатора между эталонным образцом и входом усилителя, что, в свою очередь, позволяет уменьшить постоянную времени входной цепи для потенциала компенсации и повысить быстродействие устройства в целом [18]. Кроме того, это позволяет подавать напряжение компенсации на эталонный образец, а измеряемый образец требует только заземления. Такой подход к построению предусилителя особенно важен для измерителей, применяемых в системах сканирования (сканирующий зонд Кельвина) и при контроле технологических процессов (например, при трении).

Для устранения помех от паразитных емкостей, образованных зондом и компонентами предусилителя, напряжение питания входного

предусилителя выполнено с «плавающей землей» и составляет $\pm 2,5$ В. Источник питания выполнен на DA_3 и DA_4 . Источник опорного напряжения VD_1 стабилизирует оба уровня напряжения питания. Использование «плавающей земли» позволяет сохранить соотношения потенциалов компонентов зонда неизменными при изменении напряжения компенсации в широком диапазоне.

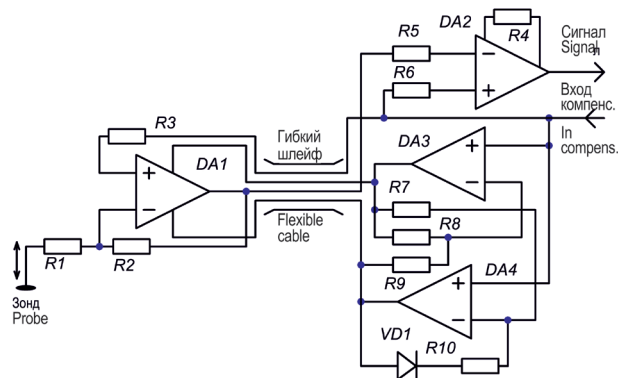


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема предварительного усилителя

Figure 4 – Schematic of the preamplifier

Дополнительное усиление сигнала с DA_1 осуществляется инструментальным усилителем DA_2 , что позволило также отделить переменный сигнал от напряжения компенсации КРП на выходе предусилителя.

Для уменьшения влияния электромагнитных наводок и шумов, а также устранения микрофонного эффекта (детектирования паразитной КРП между исследуемой поверхностью и подводящими проводами, вибрирующими вместе с эталонным образцом) предварительный усилитель вместе с эталонным образцом смонтирован на гибкой печатной плате (материал платы – фторопласт армированный керамикой AR350 фирмы ARLON), конец которой механически соединен с вибратором.

Фазовый детектор-интегратор

Фазовый детектор-интегратор, электрическая схема которого показана на рисунке 5, выполнен на основе противофазно коммутируемых с частотой модуляции КРП электронных ключей (DA_2) и интегратора на DA_3 . За счет синхронной коммутации ключей полупериоды сигнала разделяются и поступают на инвертирующий и неинвертирующий входы интегратора, поэтому при одной фазе сигнала напряжение на выходе интегратора повышается, а при противоположной

фазе – понижается. Такая схема фазового детектора-интегратора обладает высокой чувствительностью, так как в ней используется двухполупериодное фазовое детектирование и коэффициент усиления интегратора по постоянному напряжению равен коэффициенту усиления операционного усилителя с разомкнутой цепью обратной связи. Применение фазового детектирования также позволяет подавлять помехи и наводки с частотами, отличными от частоты модуляции.

Управляющее прямоугольное напряжение ключей создается формирователем на базе аналогового компаратора DA_1 из входного опорного напряжения с выхода модулятора.

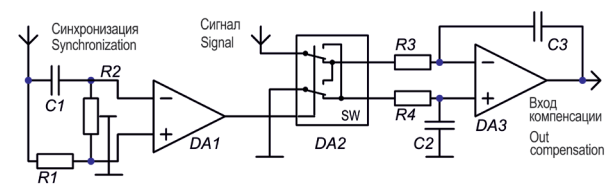


Рисунок 5 – Схема электрическая принципиальная фазового детектора-интегратора

Figure 5 – Schematic of the phase detector-integrator

Остальные электронные узлы измерительного преобразователя для уменьшения электромагнитных наводок также размещены в непосредственной близости к предварительному усилителю на общем заземленном основании. При этом соблюдено следующее правило: блоки генератора, вырабатывающие сигналы возбуждения для колебательной системы динамического конденсатора, размещены на верхней части основания. Заземленное основание играет также роль электромагнитного экрана. При этом основное подавление помех обеспечивается за счет фазового детектирования сигнала, а экранирование играет вспомогательную роль.

Модулятор и фазовый детектор-интегратор размещены на отдельной плате, на которой также смонтирована развязка по питанию. Питание генератора осуществляется непосредственно от внешнего двуполярного источника ± 12 В, а остальная схема питается напряжением ± 8 В от встроенных микромощных стабилизаторов напряжения.

Заключение

Рассмотренные в настоящей работе базовые подходы к разработке малогабаритных измерителей контактной разности потенциалов обеспечивают высокую чувствительность, быстроедей-

ствие и помехозащищенность. Это достигается выбором соответствующих схемотехнических решений, электронного дизайна и конструкций основных узлов измерителя.

Так для возбуждения механических колебаний эталонного образца применен электромеханический модулятор, в котором для обеспечения высокой амплитудно-фазовой стабильности используется модернизированный генератор с мостом Вина. В этом случае захват и поддержание частоты механического резонансного колебания осуществляются без традиционно используемого датчика колебаний.

Модернизирована схема усилителя заряда, в которой предусилитель выполнен по схеме ток-напряжение на базе современных операционных усилителей с фемтоамперными входными токами и низким уровнем шумов. Последнее достигается тем, что для уменьшения влияния паразитных емкостей, электромагнитных наводок, шумов и устранения микрофонного эффекта предварительный усилитель вместе с эталонным образцом смонтированы на гибкой печатной плате, а также с питанием, выполненным по схеме с «плавающей землей». Использование «плавающей земли» позволяет сохранить соотношения потенциалов компонентов зонда неизменными при изменении напряжения компенсации в широком диапазоне.

В модернизированной схеме фазового детектора-интегратора из-за двухполупериодного фазового детектирования коэффициент усиления интегратора по постоянному напряжению равен коэффициенту усиления операционного усилителя с разомкнутой цепью обратной связи, что позволяет в значительной степени повысить его чувствительность. Применение фазового детектирования обеспечивает подавление помех и наводки с частотами, отличными от частоты модуляции.

Преимущество разработанных измерителей контактной разности потенциалов по сравнению с известными аналогами является их малогабаритность, относительная простота и себестоимость, сравнительная быстрота измерений, улучшенное соотношение сигнал/шум и высокая чувствительность, что в совокупности имеет высокое значение для их применения в сканирующих системах, например в сканирующем зонде Кельвина, а также в системах контроля технологических процессов, например при трении.

Список использованных источников

1. Neuhaus, K. Scanning probe microscopy polarization experiments with polycrystalline $\text{Ce}_{0.8}\text{Gd}_{0.2-x}\text{Pr}_x\text{O}_{2-\delta}$ and $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{2-\delta}$ single crystals at room temperature / K. Neuhaus [et al.] // Solid State Ionics. – 2015. – 6 p. (doi:10.1016/j.ssi.2015.12.012).
2. Mazhar, M.E. Kelvin probe as an effective tool to develop sensitive p-type CuO gas sensors / M.E. Mazhar [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2015. – 22 p. (doi:10.1016/j.snb.2015.05.050).
3. Baytekin, H.T. The mosaic of Surface Charge in Contact Electrification / H.T. Baytekin [et al.] // Science. – 2011 – Vol. 333. – P. 308.
4. Casals, N. Influence of Mechanical Stress on the Potential Distribution on a 301 LN Stainless Steel Surface / N. Casals // Journal of The Electrochemical Society, 2015. – Vol. 9. – No 162. – P. 465–472.
5. Шаронов, Г.В. Контроль металлических поверхностей, обработанных алмазным наноточением, по работе выхода электрона / Г.В. Шаронов [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 196–203.
6. Vorobey, R.I. Controlling the characteristics of photovoltaic cell based on their own semiconductors / R.I. Vorobey [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – No. 8. – P. 81–85.
7. Shuji, H. Surface state bands on silicon as electron systems in reduced dimensions at atomic scales / H. Shuji // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2000. – Vol. 12. – No. 35. – P. 463–495.
8. Kondo, A. Kelvin probe imaging of photo-injected electrons in metal oxide nanosheets from metal sulfide quantum dots under remote photochromic coloration / A. Kondo [et al.] // Nanoscale. – 2015. – No. 7. – P. 12510–12515.
9. Жарин, А.Л. Методы зондовой электрометрии для разработки и исследования свойств перспективных материалов // Перспективные материалы и технологии: монография : в 2 т. / А.Л. Жарин, К.В. Пантелеев, А.К. Тявловский. – Витебск : Изд-во ВГТУ. – 2015. – Т. 1. – 398 с.
10. Li, G. Effect of thermal excitation on intermolecular charge transfer efficiency in conducting polyaniline / G. Li [et al.] // Applied physics letters. – 2004. – Vol. 85. – No. 7. – P. 1187–1189.
11. Klein, U. Contact potential differences measurement: Short history and experimental setup for classroom demonstration / U. Klein, W. Vollmann, A. Paulo // IEEE Transactions on Education. – 2003. – No. 46(3). – P. 338–344.
12. Galembeck, A. Scanning electric potential microscopy imaging of polymers: electrical charge distribution in dielectrics / A. Galembeck [et al.] // Polymer. – 2001. – Vol. 42. – P. 4845–4851.
13. Zharin, A.L. Application Macro- and Micro Kelvin Probe in Tribological Studies / A.L. Zharin // Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap between the

Macro- and Micro/Nanoscales. – Netherland : Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 445–466.

14. Пантелеев, К.В. Диагностика локальных изменений пластической деформации по работе выхода электрона / К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 1 (10). – С. 56–63.

15. Пантелеев, К.В. Методы измерений работы выхода электрона для контроля состояния поверхностей в процессе трения / К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 2. – С. 107–113.

16. Danyluk, S. Kelvin probe's stray capacitance and noise simulation / S. Danyluk [et al.] // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1 (8). – С. 94–98.

17. Bourdopoulos, G. Delta-sigma modulators: modeling, design and applications / G. Bourdopoulos [et al.]. – London : Imperial College Press, 2003. – 260 p.

18. Zharin, A.L. Contact Potential Difference Techniques As Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A.L. Zharin // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology. – Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. – P. 687–720.

Design of the contact potentials difference probes

Pantsialeyeu K.U., Mikitsevich U.A., Zharin A.L.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimisty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

Received 15.02.2016

Accepted for publication 22.04.2016

Abstract. The contact potential difference probes distinguished by great variety and produced mostly in the laboratory for specific experimental applications. As a rule, they consist of commercially available instrumentation, and have a number of disadvantages: large dimensions, complexity and high cost, small sensitivity, operating speed, noiseproof, etc. The purpose of this paper is to describe the basic approaches to design of the small dimension, complete contact potential difference probes, providing high sensitivity, operating speed, and noise immunity. In this paper the contact potential difference probe, which is a electrometer with dynamic capacitor plate at about 0.1–5 mm². These probes are could be used in scanning systems, such as a Scanning Kelvin Probe, as well as for controlling system of manufacturing processes, e.g. under friction. The design of such contact potential difference probes conducted using modern electronic components, unique circuitry and design solutions described in detail at paper. The electromechanical modulator applied for mechanical vibrations of the reference sample. To provide a high amplitude and phase stability the upgraded generator with Wien bridge was used instead traditional oscillation sensor. The preamplifier made on the base of modern operational amplifiers with femtoampere current input. The power of the preamplifier designed with «floating ground». It allows keeping the relation constant potential to the probe components when changing over a wide range the compensation voltage. The phase detector-integrator based on the electronic antiphase switches with the modulation frequency of the contact potential difference and the integrator. Fullwave phase detection would greatly increase the sensitivity of the probe. In addition, the application of the phase detection allows suppressing noise and crosstalk at frequencies different from the modulation frequency. The preamplifier and the reference sample mounted on a flexible printed circuit board and the edge mechanically connected with a vibrator. Modulator, phase detector-integrator, and other electronic components placed on a separate board. This design contributes to reduce the influence of electromagnetic interference and noise as well as removing microphonic effects, etc.

Keywords: contact potential difference, CPD, Kelvin probe, CPD probe, electron work function.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: nil_pt@bntu.by

Address for correspondence:

Pantsialeyeu K.U.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimisty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: nil_pt@bntu.by

Для цитирования:

Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Жарин А.Л.
Построение измерителей контактной разности потенциалов.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 1. – С. 7–15.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

For citation:

Pantsialeyeu K.U., Mikitsevich U.A., Zharin A.L.
[Design of the contact potentials difference probes].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 1, pp. 7–15 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

References

1. Neuhaus K., Schulze-Küppers F., Baumann S., Ulbrich G., Lerche M., Wiemhöfer H. Scanning probe microscopy polarization experiments with polycrystalline $Ce_{0.8}Gd_{0.2-x}Pr_xO_{2-\delta}$ and $Ce_{0.8}Y_{0.2}O_{2-\delta}$ single crystals at room temperature. *Solid State Ionics*, 2015, 6 p. (doi:10.1016/j.ssi.2015.12.012).
2. Mazhar M.E., Faglia G., Comini E., Zappa D., Baratto C., Sberveglieri G. Kelvin probe as an effective tool to develop sensitive p-type CuO gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 22 p. (doi:10.1016/j.snb.2015.05.050).
3. Baytekin H.T., Patashinski A.Z., Branicki M., Baytekin B., Soh S., Grzybowski B.A. The mosaic of Surface Charge in Contact Electrification. *Science*, 2011, vol. 333, pp. 308–312.
4. Casals N. Influence of Mechanical Stress on the Potential Distribution on a 301 LN Stainless Steel Surface. *Journal of The Electrochemical Society*, 2015, vol. 9, no. 162, pp. 465–472.
5. Sharonov G.V., Zharin A.L., Muhurov N.I., Pantsialeyeu K.U. [Control of metal surfaces, machined in accordance with diamond nanomachining technology, of the electron work function]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2015, vol. 6, no. 2, pp. 196–203 (in Russian).
6. Vorobey R.I., Gusev O.K., Tyavlovsky A.K., Svistun A.I., Shadurskaja L., Yarzhembiyskaja N., Kerczynski K. Controlling the characteristics of photovoltaic cell based on their own semiconductors. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2015, no. 8, pp. 81–85.
7. Shuji H. Surface state bands on silicon as electron systems in reduced dimensions at atomic scales. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2000, vol. 12, no. 35, pp. 463–495.
8. Kondo A., Yin G., Srinivasan N., Atarashi D., Sakaia E., Miyauchi M. Kelvin probe imaging of photo-injected electrons in metal oxide nanosheets from metal sulfide quantum dots under remote photochromic coloration. *Nanoscale*, 2015, no. 7, pp. 12510–12515.
9. Zharin A.L., Pantsialeyeu K.U., Tyavlovski A.K. [Methods probe electrometry for the development and study of the properties of advanced materials]. *Perspektivnye materialy i tekhnologii: monografiya* [Perspective materials and technologies: a monograph. In 2 Volumes]. Vitebsk, VSTU, vol. 2, 398 p. (in Russian).
10. Li G., Josowicz M., Janata J., Semancik S. Effect of thermal excitation on intermolecular charge transfer efficiency in conducting polyaniline. *Applied physics letters*, 2004, vol. 85, no. 7, pp. 1187–1189.
11. Klein U., Vollmann W., Paulo A. Contact potential differences measurement: Short history and experimental setup for classroom demonstration. *IEEE Transactions on Education*, 2003, no. 46(3), pp. 338–344.
12. Galembeck A., Costa C., Silva M., Souza E., Galembeck F. Scanning electric potential microscopy imaging of polymers: electrical charge distribution in dielectrics. *Polymer*, 2001, vol. 42, pp. 4845–4851.
13. Zharin A.L. Application Macro- and Micro Kelvin Probe in Tribological Studies. *Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap between the Macro- and Micro/Nanoscales*, Netherland, Kliwer Academic Publishers, 2001, pp. 445–466.
14. Pantsialeyeu K.U., Svistun A.I., Zharin A.L. [Methods for local changes in the plastic deformation diagnostics on the work function]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2015, vol. 10, no. 1, pp. 56–63 (in Russian).
15. Pantsialeyeu K.U., Svistun A.I., Zharin A.L. [Methods for work function measurements for the test of a surface in a during friction]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2014, no. 2(9), pp. 107–112 (in Russian).
16. Danyluk S., Dubanevich A.V., Gusev O.K., Svistun A.I., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L., Vorobey R.I., Zharin A.L. Kelvin probe's stray capacitance and noise simulation. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2014, no. 1(8), pp. 94–98.
17. Bourdopoulos G., Pnevmatikakis A., Anastassopoulos V., Deliyannis T. Delta-sigma modulators: modeling, design and applications, London, Imperial College Press, 2003, 260 pp.
18. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques As Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology*, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010, pp. 687–720.