

УДК 621.382

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СЕТОЧНОГО ПОЛОТНА

Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Мухуров Н.И.<sup>2</sup>, Дубаневич А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Для отладки и исследования методики контроля электрофизических свойств поверхности чувствительных элементов в виде прецизионных сеток из наноструктурированных материалов для нового поколения датчиков космической плазмы в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ был разработан лабораторный макет микропроцессорного измерительного преобразователя электростатических потенциалов с высоким пространственным разрешением. Контроль микроструктуры сеточного полотна с использованием разработанного преобразователя осуществляется на основе анализа пространственного распределения электростатического потенциала поверхности с представлением результатов контроля в виде визуализированного изображения. Преобразователь предназначен для работы совместно с установкой для измерения электростатических потенциалов неразрушающим контролем качества чувствительных элементов из наноструктурированных материалов.

Принцип работы преобразователя основан на использовании метода Кельвина-Зисмана измерения электростатических потенциалов, известный также как метод динамического конденсатора. В соответствии с этим методом чувствительный элемент (зонд) преобразователя и поверхность контролируемого образца формируют обкладки конденсатора, диэлектриком в котором является воздух (воздушный зазор между зондом и образцом). Емкость такого конденсатора зависит от площади обкладок  $S$ , расстояния между ними  $d$  и диэлектрической проницаемости среды в зазоре  $\epsilon$ . В первом приближении систему зонд-образец можно представить плоскопараллельным конденсатором, для которого величина заряда на обкладках будет прямо пропорциональна напряжению.

При перемещении одной обкладки конденсатора относительно другой (т.е. при изменении величины  $d$ ) тому же значению заряда обкладок  $Q$  будет соответствовать другая величина напряжения  $U$  между обкладками. Если одна из обкладок (зонд или образец) заземлена, сохранение его потенциала на постоянном (в данном случае, нулевом) уровне потребует изменения заряда на некоторую величину  $\partial Q$ . Первая производная от этой величины по времени представляет собой ток в цепи динамического конденса-

тора  $i(t)$ . В случае, если закон изменения зазора описывается гармоническим уравнением, т.е.

$$d_1(t) = d_{1m} \sin \omega t, \quad (1)$$

выражение для тока принимает вид

$$i(t) = U \epsilon_0 \epsilon S \frac{-\omega d_{1m} \cos \omega t}{(d_0 + d_{1m} \sin \omega t)^2}, \quad (2)$$

где  $d_0$  – начальное значение зазора зонд-образец.

Преобразователь реализует компенсационную схему измерения, в соответствии с которой в цепь динамического конденсатора последовательно включается источник компенсирующего напряжения  $U_{comp}$ . Таким образом, разность потенциалов между обкладками складывается из двух имеющих противоположный знак составляющих:

$$U = U_{CPD} + U_{comp}, \quad (3)$$

где  $U_{CPD}$  – контактная разность потенциалов (КРП) между обкладками.

Для измерительного преобразователя, реализующего метод Кельвина-Зисмана, КРП определяется разностью значений работы выхода электрона (РВЭ) контролируемого участка поверхности  $\phi_1$  и зонда  $\phi_2$  [1]:

$$U_{CPD} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{e}, \quad (4)$$

где  $e$  – элементарный заряд (заряд электрона).

Величина работы выхода коррелирует с физико-химическими и механическими свойствами металлов. Эту характеристику используют при изучении деформации и разрушения металлических твердых тел, а также при изучении явлений адсорбции и десорбции [2]. С учетом того, что РВЭ зонда  $\phi_2$  при измерениях является величиной постоянной, пространственное распределение КРП  $U_{CPD}$  по поверхности образца соответствует распределению значений РВЭ поверхности образца  $\phi_1$ , отражающему неоднородность физико-химических свойств поверхности и распределение ее дефектов.

Непосредственное измерение  $U_{CPD}$  практически невозможно из-за крайне высокого выходного сопротивления динамического конденсатора [1]. При традиционной реализации метода Кельвина-Зисмана данная проблема решается

сведением к нулю тока в цепи динамического конденсатора за счет изменения величины напряжения компенсации  $U_{comp}$  в соответствии с условием  $U_{CPD} + U_{comp} = 0$ . В то же время, вследствие инерционности цепи обратной связи преобразователя, построенного по традиционной схеме, достижение установившегося режима с полной компенсацией тока динамического конденсатора требует достаточно длительного времени (порядка 1 с). Это не позволяет осуществлять контроль поверхности с высоким пространственным разрешением, требующим выполнения измерений в большом количестве точек, с приемлемым быстродействием. Для повышения быстродействия при регистрации пространственного распределения электростатического потенциала в режиме двухкоординатного сканирования поверхности образца преобразователь реализует оригинальный метод измерения потенциалов [3], не требующий полной компенсации тока в цепи динамического конденсатора. Реализуемый метод предусматривает поочередное использование двух фиксированных значений напряжения компенсации  $U_{comp1}$  и  $U_{comp2}$ . Для каждого из этих значений фиксируется величина выходного сигнала  $i_1$  и  $i_2$ , соответственно. Согласно (2) и (3), амплитуда выходного сигнала  $i$  и величина напряжения компенсации  $U_{comp}$  находятся в прямой пропорциональной зависимости, что позволяет вычислить значение  $U_{CPD}$  на основе результатов этих двух измерений с использованием простого программного алгоритма. Реализация данных вычислений обеспечивается предусмотренным в конструкции преобразователя микропроцессором с программным обеспечением оригинальной разработки.

На рисунке 1 показан результат визуализации пространственного распределения электростатического потенциала заготовки для прецизионной сетки с наноструктурированной поверхностью с использованием макетного образца микропроцессорного преобразователя. Контролируемый образец представлял собой алюминиевую пластину круглой формы диаметром 100 мм с нанесенным покрытием из наноструктурированного оксида алюминия. Полное время получения изображения составило 52 минуты. Разрешающая способность изображения составила 1 мВ. На поверхности образца ожидалось наличие скрытых дефектов (неоднородностей) с характерными размерами от единиц микрометров до единиц сантиметров как связанных с процессами технологической обработки поверхности, так и с повреждениями / загрязнениями, возникшими в ходе хранения образца.

На визуализированном изображении прослеживаются дефекты с характерными размерами от

1 мм до 30 мм. Характерно выявление на визуализированном изображении дефекта в виде кольцевой дорожки шириной 1 мм, параллельной краю образца и отстоящей от него на 8 мм, значения потенциала в пределах которой равняются 265 мВ, тогда как математическое ожидание электростатического потенциала поверхности в целом равняется 280 мВ. Такая конфигурация дефекта указывает на то, что он является дефектом технологической обработки, а не сформировался при хранении образца (например, за счет загрязнения прецизионной поверхности). В целом проведенные испытания подтвердили возможность использования лабораторного макета измерительного преобразователя электростатических потенциалов для визуализации пространственного распределения электростатического потенциала наноструктурированных поверхностей с заявленной разрешающей способностью.

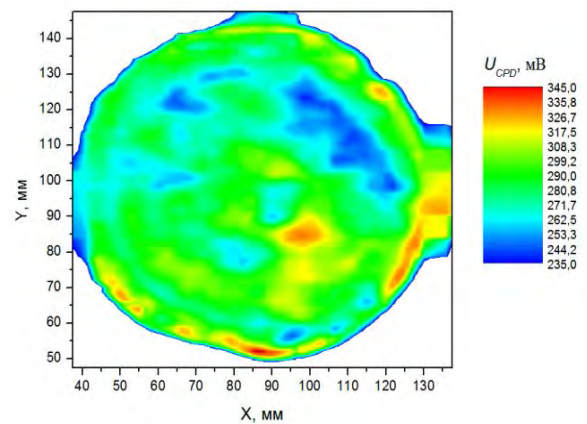


Рисунок 1 – Визуализация пространственного распределения электростатического потенциала тестового образца из алюминия с наноструктурированным покрытием

1. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A.L. Zharin // Applied Scanning Probe Methods. – 2010. – V. 14. – P. 687-720.
2. Ибрагимов Х.И. Работа выхода электрона в физико-химических исследованиях / Х.И. Ибрагимов, В.А. Корольков. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 526 с.
3. Способ измерения контактной разности потенциалов: заявка на патент ЕА 201500105/26 : МПК G01R 19/00, G01N 27/00 (2014.01) / О.К. Гусев, Р.И. Воробей, А.Л. Жарин, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский, К.В. Пантелеев, А.В. Дубаневич ; дата публ.: 21.01.2015.