

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ  
МАТЕРИАЛОВ ЦИФРОВЫМ ЗОНДОМ КЕЛЬВИНА**

**Пантелеев К.В., Тявловский А.К., Гусев О.К.,  
Воробей Р.И., Свистун А.И., Жарин А.Л.**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь, E-mail: nilpt@tut.by*

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований с использованием разработанных в НИЛ ПТ БНТУ (г. Минск) цифровых зондов Кельвина, предназначенных для систем зондового картирования пространственного распределения работы выхода электрона поверхности (металлы, сплавы и полупроводники) и электростатического потенциала (диэлектрические материалы). Цифровой зонд Кельвина отличается от традиционных аналоговых (метод Кельвина–Зисмана [1]) улучшенными точностными характеристиками (0,1–1 мВ), производительностью (время одного измерения в 20–50 раз меньше, чем в традиционных зондах), расширенным диапазоном измерений (для диэлектрических материалов до сотен вольт и более) при пространственном разрешении от 0,5 мм, что в совокупности значительно расширяет область их применения. Кроме того, разработанные зонды представляют собой функционально законченные измерительные устройства, обладающие относительно небольшими габаритами (70x50x15 мм), что обеспечивает их использование в составе практически любых специализированных измерительных систем и комплексов, испытательных стендов и технологических линиях.

**Цифровой зонд Кельвина**

В традиционном методе Кельвина–Зисмана вибрирующий чувствительный элемент и измеряемая поверхность образуют обкладки динамического конденсатора. Вследствие различия работы выхода электрона материалов пластин в зазоре конденсатора возникает контактная разность потенциалов (КРП). Процедура измерения заключается в подаче на измерительный конденсатор внешнего постоянного напряжения для компенсации КРП. Обычно напряжение компенсации вырабатывается автоматически с помощью фазовых следящих систем.

В цифровом зонде Кельвина [2] реализована косвенная (некомпенсационная) схема определения напряжения компенсации, заключающаяся в математическом анализе компенсационной зависимости сигнала измерительного динамического конденсатора, полученной по фиксированным внешним потенциалам. Потенциалы вырабатываются с помощью драйвера управляющим микропроцессором, который также задает вибрацию зонда. Фазовое детектирование и интегрирование выходного сигнала для автокомпенсации измеряемой величины при этом не требуется, что в несколько десятков раз (по сравнению с аналоговым зондом по методу Кельвина–Зисмана) уменьшает время измерения, исключает погрешности следящей системы и цифро-аналогового преобразования. При соответствующем перепрограммировании цифровой зонд перестраивается для работы в режиме измерения электростатических потенциалов диэлектрика и обеспечивает измерение в широком диапазоне возможных потенциалов, достигающих до сотен вольт и более (для аналоговых зондов последнее является недоступным вследствие необходимости компенсации).

**Исследование прецизионных поверхностей цветных металлов и сплавов**

В качестве объектов исследования использовались образцы медных и алюминиевых сплавов [3]. Образцы изготавливали по технологии алмазного наноточения (НИИПФП БГУ, г. Минск). Данная технология обеспечивает шероховатость обработки поверхности на уровне  $Ra \leq 0,005$  мкм. Технологическое воздействие резца приводит к окислительным процессам и изменению физико-химических свойств обрабатываемой поверхности. При этом толщина образующейся оксидной пленки может быть сравнима или больше высоты максимальной шероховатости. Поэтому для достижения заданных свойств поверхности контроль геометрических параметров оказывается недостаточным. Исследования показали, что

работа выхода электрона и ее относительные отклонения по поверхности, в совокупности с геометрическими параметрами, позволяют в полной мере контролировать достижение заданных эксплуатационных характеристик обрабатываемых поверхностей. Для корректной интерпретации результатов исследования отметим, что наноточение происходит на уровне кристаллической решетки, и деформация зерен материала практически отсутствует. Результаты исследований образца алюминиевого сплава АМГ-2 с 12 и 14 классом чистоты обработки поверхности представлены на рисунке 1, а и б, соответственно.

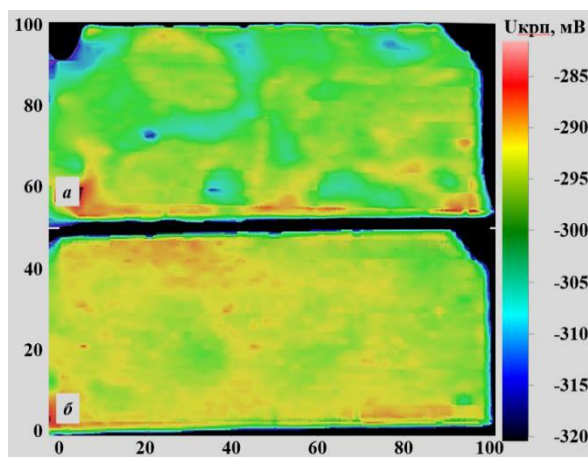


Рисунок 1 – Топологии распределения работы выхода электрона поверхности образцов из алюминиевого сплава АМГ-2 с 12 (а) и 14 (б) классом чистоты обработки поверхности, обработанных по технологии алмазного наноточения

#### Исследование поверхности полупроводниковых пластин

На рисунке 2 представлены результаты исследований поверхности полупроводниковой пластины марки КДБ-10 покрытой оксидом кремния (ОАО «ИНТЕГРАЛ», г. Минск) по пространственному распределению электростатического потенциала [4].

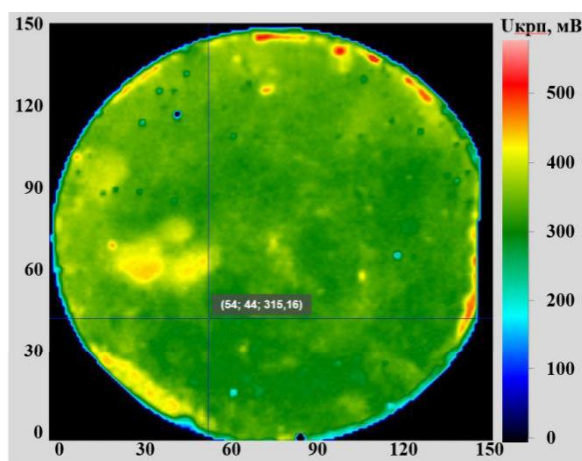


Рисунок 2 – Визуализированные изображения топологии распределения электростатического потенциала поверхности полупроводниковой пластины марки КДБ-10 с диэлектрическим покрытием SiO<sub>2</sub> диаметром 150 мм

Сопоставление результатов, полученных с использованием предложенной методики, с результатами традиционных методов на основе исследования  $C-V$  характеристик, показало, что в целом результаты измерений сравнимы и хорошо коррелируют между собой. При этом информативность контроля может быть повышена путем использования дополнительных зондирующих воздействий, таких как освещение оптическим излучением различных длин волн, заряджение поверхности в коронном разряде, импульсное магнитное воздействие, нагрев и др. Анализ изменения потенциального рельефа в процессе и после внешних воздействий позволяет получить дополнительную информацию о природе и свойствах объекта контроля, определять тип и физические параметры наиболее распространенных дефектов.

### **Визуализация пространственного распределения электростатического потенциала полимеров**

Задача определения электростатического потенциала (заряда) диэлектрических материалов, его пространственного распределения и изменения во времени является актуальной, например, для исследования механизмов электризации и релаксации зарядов электретов, изоляторов аэрокосмической аппаратуры, металлополимерных трибосопряжений, материалов для хранения продуктов питания и др. Как правило, заданные свойства композитов достигаются введением в полимерную матрицу дисперсных частиц. Эти частицы образуют центры структурообразования, а границы раздела функциональных групп и надмолекулярных образований имеют особую структуру насыщения центрами захвата с различными энергиями активации, в которых стабилизируются электроны. Поэтому неоднородность распределения электропотенциала характеризует не только электрофизические свойства, но и изменения надмолекулярной структуры, степени ориентации макромолекул, дефектности и др. На рисунке 3 представлено визуализированное изображение распределения электропотенциала диэлектрического композита ПА-6+30 % МУНТ, полученного методом экструзии (ИММС НАНБ, г. Гомель). Основным наблюдаемым эффектом – неоднородное распределение потенциала относительно верхнего и нижнего края.

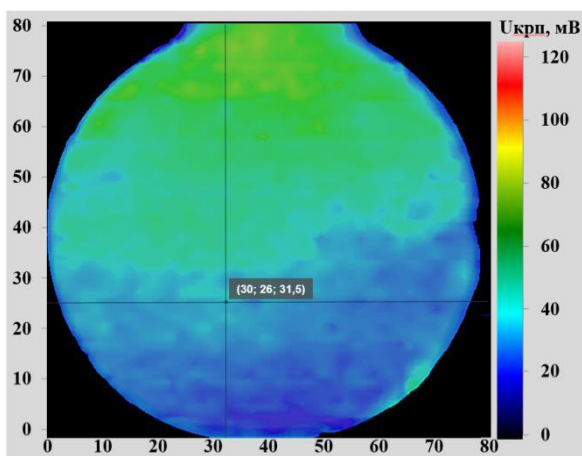


Рисунок 3 – Визуализированное изображение топологии пространственного распределения электростатического потенциала композита ПА-6+30 % МУНТ

*Авторы благодарят Мухурова Н. И., Шаронова Г. В., Пилипенко В. А., Кривогуза Ю. М. за предоставленные для исследования опытные образцы материалов.*

#### **Список литературы:**

1. Пантелеев, К. В. Построение измерителей контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев, В. А. Микитевич, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 7–15.
1. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. К. Тявловский, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.
2. Pantsialeueu, K. U. Charge sensitive techniques in control of the homogeneity of optical metallic surfaces / K. Pantsialeueu, A. Zharin, K. Kierczynski // Przegląd Elektrotechniczny. – 2016. – R. 92, №8. – P. 190 – 193.
3. Неразрушающий контроль изделий с прецизионными поверхностями на основе методов зондовой электрометрии / Р. И. Воробей, О. К. Гусев, А. В. Дубаневич, А. Л. Жарин, К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. К. Тявловский, К. Л. Тявловский // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 1. – С. 4–17.