

- ken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. – 2006. – 790 p.
2. Zharin, A. L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology (edited by B. Bhushan). – Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010. – P. 687-720.
3. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. Кн. 1,2 / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 912 с.

УДК 621.382

МЕТОДИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РВЭ

Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Жарин А.Л.¹, Мухуров Н.И.², Тявловский А.К.¹,
Тявловский К.Л.¹, Свистун А.И.¹, Дубаневич А.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

²Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Функциональность, надежность и технические характеристики микросенсорных устройств на основе наноструктурированных материалов в значительной степени зависят от чистоты и однородности электрофизических свойств их поверхности. Особенностью таких устройств является требование, в ряде случаев, распределения свойств поверхности по определенному закону. Вследствие высокой чувствительности микросенсорных устройств контроль качества поверхности должен выполняться бесконтактным неразрушающим способом, что обеспечивают методы, основанные на измерении контактной разности потенциалов (КРП) поверхности с помощью бесконтактного зонда Кельвина [1].

В результате проведенных исследований разработаны технические требования к методике сплошного неразрушающего контроля электрофизических свойств чувствительных элементов из наноструктурированных материалов для нового поколения датчиков потока космической плазмы. В основу методики положен метод измерения контактной разности потенциалов на основе динамического конденсатора (метод Кельвина-Зисмана), основанный на явлении возникновения разности электростатических потенциалов между двумя проводящими пластинами, характеризующимися различными значениями работы выхода электрона (РВЭ) поверхности φ_S и φ_P при обеспечении условий для беспрепятственного обмена носителями заряда между ними. Последнее может быть обеспечено, например, за счет сближения пластин на малое расстояние, достаточное для обмена электронами вследствие эффекта термоэмиссии при нормальной температуре, за счет ионизации воздуха в зазоре между пластинами (метод Кенрика) или за счет внешней электрической цепи (метод Кельвина-Зисмана). В соответствии с условием термодинамического равновесия, при этом должно происходить выравнивание уровней Ферми, что приводит к возникновению разности потенциалов между пластинами. Метод Кельвина-Зисмана предполагает включение в цепь измерительного

конденсатора, формируемого пластинами, источника компенсирующей ЭДС U_{CPD} , обеспечивающей приведение к нулю протекающих между пластинами токов. Тогда в состоянии равновесия будет соблюдаться условие

$$eU_{CPD} + \varphi_S - \varphi_P = 0, \quad (1)$$

откуда

$$U_{CPD} = \frac{\varphi_P - \varphi_S}{e}. \quad (2)$$

Величина U_{CPD} характеризует разность потенциалов поверхности исследуемого образца и измерительного преобразователя. Работа выхода электрона φ_S проводящей поверхности, в том числе наноструктурированной, связана с такими характеристиками материала, как наличие и концентрация дислокаций кристаллической структуры, внутренние механические напряжения, межкристаллитная коррозия, отклонения химического состава поверхности и т.п. Существенно, что при измерениях РВЭ методом Кельвина-Зисмана выходной сигнал зонда пропорционален среднему значению РВЭ в области контроля, а не ее минимальному значению, как при использовании эмиссионных методов [2]. Поскольку размеры дефектов много меньше линейных размеров зонда, такое аппаратное усреднение сигнала обеспечит интегральную оценку плотности дефектов в области контроля, тогда как эмиссионные методы дают менее диагностически значимую экстремальную оценку. Таким образом, измерения РВЭ поверхности чувствительных элементов из наноструктурированных материалов на основе контроля электростатических потенциалов позволяют выявлять дефекты их поверхности и оценивать их концентрацию. При этом величина φ_P , как правило, неизвестна и может изменяться под влиянием факторов окружающей среды, главным образом, вследствие адсорбции различных веществ на поверхности измерительного преобразователя. Такие изменения являются сравнительно медленными, и при измерениях электростатического потенциала поверхности образца в скани-

рующем режиме значение φ_P в течение всего времени контроля может считаться константой. В этом случае разность измеренных значений электростатических потенциалов двух участков поверхности составит

$$\begin{aligned} \Delta U_{CPD} &= U_{CPD1} - U_{CPD2} \\ &= \frac{\varphi_P - \varphi_{S1}}{e} - \frac{\varphi_P - \varphi_{S2}}{e} \\ &= \frac{\varphi_{S2} - \varphi_{S1}}{e}. \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда следует, что измерения КРП поверхности методом Кельвина-Зисмана в сканирующем режиме позволяют выявлять неоднородности распределения РВЭ, отражающие отклонения их значений от среднего для данной поверхности, что может быть использовано для неразрушающего выявления дефектов и определения их локализации.

В соответствии с разработанными техническими требованиями, методика обеспечивает измерение значений электрического потенциала поверхности в выбранных точках поверхности чувствительного элемента в виде прецизионной сетки, определение математического ожидания и среднего квадратического отклонения значений электрического потенциала контролируемой поверхности и представление результатов измерений в виде визуализированного изображения пространственного распределения электростатического потенциала поверхности и гистограммы распределения значений электростатического потенциала поверхности. Методика обеспечивает контроль прецизионных сеток с габаритными размерами от 40×40 мм до 105×105 мм при пространственном разрешении не хуже 1,0 мм. Величина пространственного разрешения определяется требованиями оперативности контроля, оговаривающими выполнение измерений за время не более 1...2 ч. Реализация компенсационного метода измерения КРП с помощью вибрирующего зонда Кельвина, обеспечивающего наибольшую точность измерений [1], требует остановки зонда в каждой точке, в которой проводятся измерения, т.е. сканирование проводится в дискретном режиме. При времени установления сигнала зонда Кельвина до 1 с, определяемом конструкцией зонда, полное время сканирования поверхности размером 40×40 точек с построением визуализированного изображения составляет порядка 30 минут. Повышение пространственного разрешения требует дополнительных исследований, в том числе, связанных с анализом путей программной (компьютерной) обработки измерительного сигнала для достижения субпиксельного разрешения. Диапазон измерения электростатических потенциалов составляет от минус 2000 до 2000 мВ при разрешении не хуже 2,0 мВ, что достаточно для контроля металлических (проводящих) поверхностей с учетом типичных значений РВЭ металлов.

Отличительными особенностями методики являются отсутствие каких-либо разрушающих воздействий на исследуемый образец и возможность выявления дефектов структуры, недоступных другим неразрушающим (в частности, оптическим) методам контроля.

Предварительные результаты применения разрабатываемой методики для исследования поверхности элемента микросенсорного устройства из наноструктурированного алюминия показали, что анализ пространственного распределения потенциала поверхности прецизионных поверхностей позволяет выявлять неоднородность их электрофизических свойств, отражающую распределение дефектов поверхности. В качестве примера на рисунке 1 показано пространственное распределение электростатического потенциала алюминиевой пластины с наноструктурированной поверхностью. Шкала линейных размеров на изображении условная, истинные размеры образца составляют 60×70 мм. На визуализированном изображении видна неоднородность электрофизических свойств поверхности, проявляющаяся в росте значений потенциала (соответствующего, согласно формуле (2), уменьшению значений РВЭ поверхности) от левого верхнего к правому нижнему на рисунке 1 углу пластины. Прослеживается концентрация дефектов у краев пластины. Видно, что характерные размеры неоднородностей намного превышают линейные размеры зонда, составляя от 3 до 30 мм, что говорит о возможности контроля качества наноструктурированных поверхностей с выбранной разрешающей способностью.

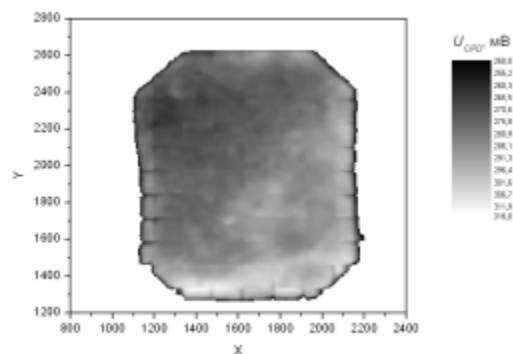


Рисунок 1 – Пример визуализированного изображения распределения РВЭ наноструктурированной поверхности алюминия

1. Zharin, A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // 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.: Интернет Инжиниринг, 2002. – 526 с.