

УДК 621.9.015, 620.184

## ВЫЯВЛЕНИЕ СКРЫТЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДА КЕЛЬВИНА

Свистун А. И.<sup>1</sup>, Жарин А. Л.<sup>1</sup>, Тявловский А. К.<sup>1</sup>, Пантелеев К. В.<sup>1</sup>, Микитевич В. А.<sup>1</sup>,  
Воробей Р. И.<sup>1</sup>, Гусев О. К.<sup>1</sup>, Тявловский К. Л.<sup>1</sup>, Мухуров Н. И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
<sup>2</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Объектом исследования являлись алюминиевые подложки для создания сенсорных устройств на основе анодного оксида алюминия, прошедшие механическую обработку в виде шлифовки и рихтовки. Предметом исследования – выявление остаточных механических напряжений и иных дефектов поверхности для оценки качества данной обработки методом сканирующего зонда Кельвина. Показано, что данный метод позволяет эффективно выявлять остаточные пластические деформации алюминиевых подложек, являющиеся следствием их механической обработки с разрешением, достаточным для выявления механических напряжений, связанных с отдельными шероховатостями.

**Ключевые слова:** поверхность; контактная разность потенциалов; сканирующий зонд Кельвина; дефект; шероховатость.

## DETECTING HIDDEN MECHANICAL DEFECTS OF ALUMINUM SUBSTRATES WITH A SCANNING KELVIN PROBE

Svistun A.<sup>1</sup>, Zharin A.<sup>1</sup>, Tyavlovsky A.<sup>1</sup>, Pantsialeu K.<sup>1</sup>, Mikitsevich U.<sup>1</sup>,  
Vorobey R.<sup>1</sup>, Gusev O.<sup>1</sup>, Tyavlovsky K.<sup>1</sup>, Mukhurov N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University  
<sup>2</sup>SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology"  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The object of the study was aluminum substrates for creating sensor devices based on anodic aluminum oxide, which underwent mechanical processing in the form of grinding and straightening. The subject of the study was the detection of residual mechanical stresses and other surface defects to assess the quality of this processing using the scanning Kelvin probe technique. The technique applied allows for the effective detection of residual plastic deformations of aluminum substrates resulting from their mechanical processing with a resolution sufficient to detect mechanical stresses associated with individual roughnesses.

**Key words:** surface, contact potential difference, scanning Kelvin probe, defect, roughness.

Адрес для переписки: Тявловский А. К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

При создании сенсорных устройств на основе анодного оксида алюминия и других функциональных, в том числе наноструктурированных, материалов большую роль играет качество поверхности, на которой формируется анодный оксид. При этом финишная обработка поверхности, включая электрохимическое полирование, не исключает наличия невыявленных скрытых дефектов в виде остаточных пластических деформаций, создающих, вследствие своей неравномерности, механические напряжения в приповерхностных областях подложки. Такие напряжения являются локальными и их выявление требует картирования всей поверхности подложки, которое должно осуществляться неразрушающим бесконтактным методом вследствие высоких требований к чистоте поверхности для выращивания анодного оксида алюминия.

Этим требованиям удовлетворяет метод сканирующего зонда Кельвина, основанный на регистрации контактной разности потенциалов (КРП) между участком поверхности образца и чувстви-

тельным элементом электрометрического зонда, составляющими две обкладки динамического конденсатора [1]. Метод отличается исключительно высокой поверхностной чувствительностью, при этом выходной измерительный сигнал является многопараметрическим [2] и отражает параметры как химического (неоднородности состава, окисление, наличие адсорбированных веществ и загрязнений), так и механического (присутствие различных дефектов кристаллической решетки, кристаллографическая ориентация, наличие и знак механических напряжений и т. д.) состояния поверхности. В связи с этим для интерпретации визуализированного изображения пространственного распределения КРП требуется дополнительная информация об объекте измерений [3].

Объектом исследования в настоящей работе являлись алюминиевые подложки для создания сенсорных устройств на основе анодного оксида алюминия, прошедшие механическую обработку в виде шлифовки и рихтовки, предметом исследования – выявление остаточных механических

напряжений и иных дефектов поверхности для оценки качества данной обработки. Высокая химическая однородность материала пластин позволяла трактовать результаты сканирования в первую очередь как показатели механического состояния поверхности.

Исследуемые образцы характеризовались высокими значениями шероховатости поверхности с размером шероховатостей, достигавшим 200...400 мкм. Размер образцов составлял 60×60 мм. При этом отклонения от плоскостности составляли величину меньше высоты шероховатостей, что достигалось рихтовкой образцов после их шлифовки. Следует отметить, что величина выходного сигнала сканирующего зонда Кельвина практически не зависит от величины зазора зонд-образец, влияющего только на пространственную разрешающую способность зонда и соотношение сигнал/шум [4], что позволяло исключить интерпретацию особенностей пространственного распределения КРП на визуализированном изображении как геометрических отклонений формы поверхности. Для исследований использовался опытный образец установки неразрушающего сканирования прецизионных поверхностей, разработанный и используемый в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ, и программное обеспечение собственной разработки.

Результаты исследований показали, что значения КРП не зависят от величины шероховатости поверхности и составляют в среднем 240 мВ в недеформированных областях всех исследованных образцов. При этом в области пластических деформаций после рихтовки для всех образцов имело место значительное понижение регистрируемых значений КРП до 40–80 мВ, что соответствует приращению относительных значений работы выхода электрона (РВЭ) на 160–200 мэВ. Типичной в этом отношении является карта пространственного распределения КРП алюминиевой подложки шероховатостью 200 мкм, приведенная на рисунке 1.

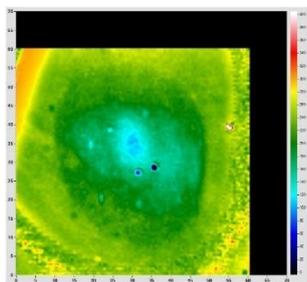


Рисунок 1 – Визуализированная карта распределения КРП поверхности алюминиевой подложки шероховатостью 200 мкм

На приведенном изображении прослеживается «ступенчатость» изменения значений КРП, соответствующая нескольким последовательным стадиям рихтовки. Кроме того, на карте распреде-

ления КРП наблюдаются локальные практические точечные области с резко отличающимися значениями КРП, что может быть отнесено на счет локальных загрязнений поверхности. Для наблюдения и анализа данных эффектов удобно использовать трехмерный вид представления пространственного распределения КРП, приведенный на рисунке 2. Характерные неровности (колебания) значений КРП с небольшой амплитудой и высокой пространственной частотой могут быть отнесены на счет разрешения сканирующим зондом отдельных шероховатостей, вершины и впадины которых также являются концентраторами механических напряжений. Вследствие этого потенциальный рельеф поверхности в определенной степени отражает геометрический рельеф шероховатостей.

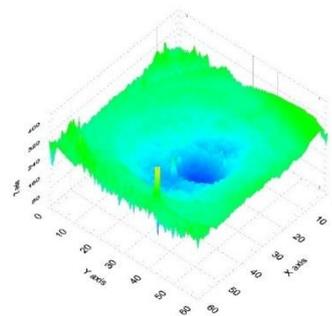


Рисунок 2 – Трехмерный вид распределения КРП поверхности алюминиевой подложки шероховатостью 200 мкм

Таким образом, метод сканирующего зонда Кельвина позволяет эффективно выявлять остаточные пластические деформации алюминиевых подложек, являющиеся следствием их механической обработки (рихтовки). При этом практически достигнутая пространственная разрешающая способность электрометрического зонда оказалась достаточной для разрешения отдельных шероховатостей, также являющихся микроконцентраторами механических напряжений.

#### Литература

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. Многопараметрические измерения электрического потенциала поверхности с использованием адаптивной односигнальной модели / К. Л. Тявловский [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2008. – № 2. – С. 27–32
3. Алгоритм неразрушающего контроля изделий с прецизионными поверхностями на основе методологии измерения параметров объектов с неопределенными состояниями / Р. И. Воробей [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 2. – С. 29–36.
4. Тявловский, А. К. Математическое моделирование дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1 (4). – С. 31–36.