

УДК 621.9.015, 620.184

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ И СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Жарин А. Л.<sup>1</sup>, Тявловский А. К.<sup>1</sup>, Пантелеев К. В.<sup>1</sup>, Свистун А. И.<sup>1</sup>, Микитевич В. А.<sup>1</sup>,  
Воробей Р. И.<sup>1</sup>, Гусев О. К.<sup>1</sup>, Борисенок С. В.<sup>1</sup>, Самарина А. В.<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.** Для исследования дефектности поверхности анодного оксида алюминия применен комплексный подход, включающий анализ пространственного распределения относительных значений работы выхода электрона и поверхностной фото-ЭДС методом сканирующего зонда Кельвина и подробное изучение дефектных областей методом оптической микроскопии. Сканирование поверхности образца электрометрическим зондом с низким пространственным разрешением обеспечивает быстрое предварительное выявление и локализацию областей скопления дефектов, тогда как оптическая микроскопия позволила определить конкретный вид выявленных дефектов.

**Ключевые слова:** анодный оксид алюминия; работа выхода электрона; сканирующий зонд Кельвина; структурный дефект; оптическая микроскопия.

## STUDY OF ANODE ALUMINUM OXIDE DEFECTS WITH OPTICAL MICROSCOPY AND SCANNING PROBE ELECTROMETRY TECHNIQUES

Zharin A.<sup>1</sup>, Tyavlovsky A.<sup>1</sup>, Pansialeyeu K.<sup>1</sup>, Svistun A.<sup>1</sup>, Mikitsevich U.<sup>1</sup>,  
Vorobey R.<sup>1</sup>, Gusev O.<sup>1</sup>, Borisyonok S.<sup>1</sup>, Samaryna A.<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 study of the anodic aluminum oxide surface defectiveness was performed with a comprehensive approach that included an analysis of the spatial distribution of the relative surface work function and surface photo-EMF using the scanning Kelvin probe combined with a detailed study of the defective areas with optical microscopy. Low-resolution scanning of the sample's surface with an electrometric probe ensures rapid preliminary detection and localization of defective areas while optical microscopy made it possible to determine the specific type of defects found.

**Key words:** anode Aluminum oxide; work function; scanning Kelvin probe; structural defect; optical microscopy.

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

Сложность анализа дефектов анодного оксида алюминия связана с малыми характерными размерами возможных дефектов, в ряде случаев, имеющих поперечный размер менее длины волны видимого оптического излучения, что делает их недоступными прямому наблюдению методами оптической микроскопии. Структура поверхности анодного оксида алюминия и ее дефекты может быть эффективно визуализирована методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), однако АСМ характеризуется крайне малыми размерами поля зрения (порядка единиц микрометров), что делает практически невозможным полное исследование поверхностей макроскопических размеров (десятки миллиметров), а также не позволяет локализовать расположение выявленных дефектов в пределах макроскопической поверхности. В то же время, для характеристик конечного изделия значение имеет не столько факт наличия дефектов и их конкретный вид, сколько средняя концентрация дефектов в некоторой области и их

пространственное распределение в пределах рабочей поверхности образца.

Решение данной задачи может быть обеспечено комплексным применением нескольких методов исследования. В настоящей работе первичный анализ поверхности для выявления областей с повышенной концентрацией дефектов пористости анодного оксида алюминия выполнялся методом сканирующей зондовой электрометрии (сканирующего зонда Кельвина, SKP) [1]. Данный метод обладает исключительно высокой чувствительностью к любым изменениям работы выхода электрона (РВЭ) с исследуемой поверхности, причем для сканирующего зонда Кельвина характерно усреднение значений РВЭ под площадью чувствительного элемента зонда. Таким образом, измерительный сигнал оказывается пропорционален концентрации дефектов в пределах данной площади и их выраженности, понимаемой как степень отличия РВЭ дефектов от РВЭ бездефектной поверхности. При этом сами значения

РВЭ оцениваются косвенно, как относительные величины, по значению непосредственно регистрируемой зондом контактной разности потенциалов (КРП), характеризующей разность значений РВЭ чувствительного элемента зонда Кельвина и участка поверхности. Пространственное разрешение использованного в исследованиях зонда Кельвина составляло порядка 0,5 мм, что исключало разрешение отдельных дефектов, однако обеспечивало малое время полного сканирования поверхности и позволяло локализовать области наибольшей концентрации дефектов, подлежащие более подробному изучению. Дополнительное воздействие оптическим излучением (интенсивное освещение поверхности) в процессе сканирования с регистрацией возникающей при этом внутренней фото-ЭДС позволяло разделить вклад в измерительный сигнал сканирующего зонда Кельвина собственно отклонений РВЭ, характеризующих структурный дефект, и электрического потенциала, создаваемого адсорбированным зарядом на поверхности образца [2].

На втором этапе области поверхности, демонстрирующие отклонения значений РВЭ (или КРП) от среднего для образца, более подробно исследовались с помощью оптического микроскопа с последовательно изменявшимся увеличением от  $\times 10$  до  $\times 100$ . Это позволило более точно локализовать дефекты и определить их характер.

На рисунке 1 приведен микроснимок скола одного из исследованных образцов, представлявшего собой фотонный кристалл анодного оксида алюминия, сформированный периодическим изменением плотности электрического тока анодирования  $0,4 \text{ mA/cm}^2$  и  $1,8 \text{ mA/cm}^2$  в электролите 1,0 М серная кислота с добавкой этиленгликоля (50 % об.).

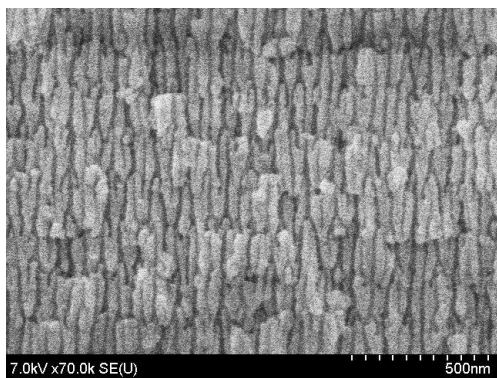


Рисунок 1 – Микроснимок скола исследованного образца фотонного кристалла анодного оксида алюминия

Размеры поверхности образца для исследования составляли  $10 \times 10$  мм. Зарегистрированное сканирующим зондом Кельвина распределение КРП поверхности образца (рисунок 2, а) демонстрирует две резко отличающиеся по электрофизи-

ческим свойствам области. В пределах  $\frac{3}{4}$  поверхности образца средние значения КРП составляют приблизительно 380 мВ, тогда как в пределах  $\frac{1}{4}$  (левый верхний квадрант) среднее значение КРП составляет  $-280$  мВ. В этой же области имеют место высокие значения поверхностной фото-ЭДС, достигающие 300 мВ (рисунок 2, б). На основной части поверхности, характеризующейся положительными значениями КРП 380 мВ, поверхностная фото-ЭДС близка к нулю. В совокупности это позволяет предположить, что в левом верхнем квадранте образца имеет место высокая концентрация дефектов, обеспечивающих возможность миграции поверхностного электрического заряда под воздействием оптического излучения.

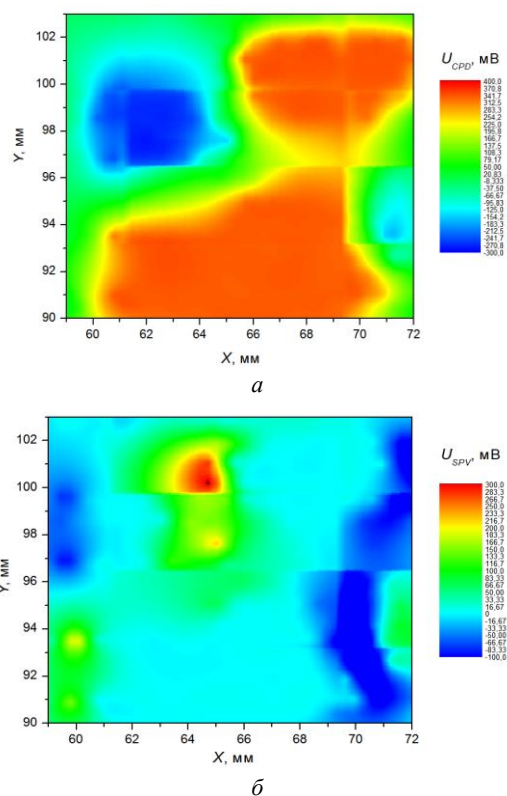


Рисунок 2 – Распределение КРП (а) и поверхностной фото-ЭДС (б) поверхности образца в целом

Один из локализованных в данной области дефектов в виде микроскопического включения, явившегося центром формирования кольцевых структур в анодном оксиде алюминия, хорошо просматривается на оптическом изображении с увеличением  $\times 10$  (рисунок 3, а). Дополнительное увеличение до  $\times 40$  (рисунок 3, б) и  $\times 100$  (рисунок 3, в) в пределах той же области позволило выявить более мелкие дефекты, однако информация о более крупных структурных нарушениях с характерными размерами, превышающими поле зрения микроскопа, при этом становится недоступной.

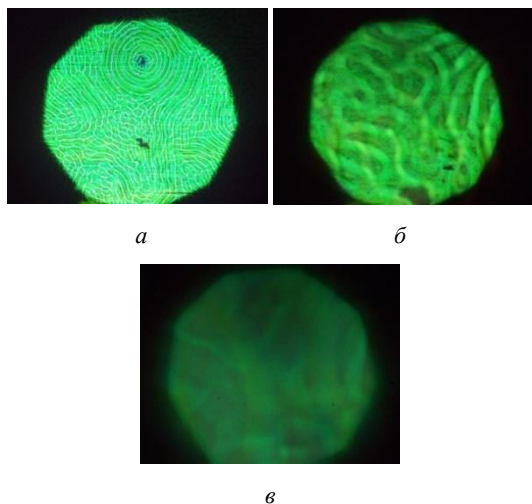


Рисунок 3 – Оптическое изображение дефектной области с увеличением  $\times 10$  (а),  $\times 40$  (б) и  $\times 100$  (в)

Результаты исследований показали, что исследование поверхности анодного оксида алюминия методом сканирующего зонда Кельвина позво-

ляет эффективно выявлять и локализовать области концентрации структурных дефектов, при этом регистрируемые зондом значения КРП могут использоваться как условная количественная характеристика степени дефектности участка поверхности. Для уточнения вида дефектов могут использоваться дополняющие методы, такие как оптическая или атомно-силовая микроскопия, обеспечивающие более высокое пространственное разрешение, но малое (недостаточное для начальной локализации дефектов) поле контроля.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках задания 1.10 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций».

#### 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. Растровая сканирующая фотостимулированная электрометрия для контроля прецизионных поверхностей / Р. И. Воробей [и др.] / Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 10. – С. 66–73.

УДК 621.391

### ТЕСТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ УЯЗВИМОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Завадская Т. Е.

*Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** Показаны критичность волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) к несанкционированному доступу (НСД), который может осуществляться неинтрузивными способами. Показана примерная соответствующей лабораторной установки.

**Ключевые слова:** волоконно-оптическая линия связи, несанкционированный доступ, уязвимость линии, требования безопасности.

### TESTING THE INFORMATION VULNERABILITY OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES

Zavadskaya T.

*Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The criticality of a fiber-optic communication line (fiber optic line) to unauthorized access (NSD), which can be carried out in non-intrusive ways, is shown. An approximate model of the corresponding laboratory installation is shown.

**Key words:** fiber-optic communication line, unauthorized access, vulnerability of the line, security requirements.

*Адрес для переписки: Завадская Т. Е., ул. Вторая Бауманская, 5, г. Москва 107005, Российская Федерация  
e-mail: zavadskaya@bmstu.net*

Почти все преимущества ВОЛС не вызывают сомнений, но тезис о хорошей защищенности волоконно-оптической линии связи от несанкционированного доступа (НСД) требует разъяснений. Определимся, что применительно к ВОЛС это означает невозможность перехвата информации без физического нарушения целостности волоконно-оптической линии и отсутствие паразитных наводок [1].

В Центре компетенций компании «Открытые технологии» был собран стенд для исследования возможной уязвимости ВОЛС, представляющий

собой модель распределенного центра обработки данных. Оптическая магистраль имитировалась кросс-панелью с петлей из разделанного многожильного оптического кабеля для внешней проводки. В качестве перехватчика использовалось пассивное устройство типа «ответвитель-прищепка» FOD 5503. Такое устройство создает микроизгиб в волокне и ответвляет сигнал, который может быть получен через имеющийся патч-корд. В процессе тестирования удалось перехватить сигнал, передаваемый в одном направлении.