

МОНИТОРИНГ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Классический приватный университет, г. Запорожье

Розроблено алгоритм методики експрес-аналізу мікроструктури поверхні поруватого кремнію на типових зображеннях електронної мікроскопії та визначено чисельні характеристики поруватої структури кремнію.

Разработан алгоритм методики экспресс-анализа микроструктуры поверхности пористого кремния на типовых изображениях электронной микроскопии и определены численные характеристики пористой структуры кремния.

Введение. Развитие современной электроники связано с наноструктурными материалами, среди которых следует выделить пористый кремний, состоящий из сети пор [1,2] с узкими каналами, ориентированными вглубь кремниевого образца. Данная структура материала имеет большую удельную поверхность ($10 \dots 800 \text{ м}^2/\text{см}^3$) и может быть использована при разработке нанокompозитных покрытий солнечных элементов и сенсорных структур.

Для измерения удельной поверхности и пористости материала используют метод тепловой десорбции азота [3], который позволяет получать достоверные данные, но является достаточно трудоемким процессом, так как длительность измерения одного образца достигает 24 ч. В производственных условиях необходимы более оперативные методы определения параметров микроструктуры исследуемых объектов, то есть так называемые методы экспресс-анализа, которые позволяют осуществлять количественный теоретический анализ структуры исследуемого изображения [4-8]. В частности, при формировании пористого кремния необходимо определять площадь поверхности его шероховатого приповерхностного горизонтального слоя, служащего контактным слоем при изготовлении структур с *p-n* переходом.

Возможности решения указанных задач могут быть связаны с разработкой алгоритмов распознавания микрообъектов-кластеров с заданной структурой на полученных растровых изображениях электронной микроскопии, которые представляют рельеф исследуемой поверхности. Такими микрообъектами-кластерами на растровых изображениях являются пиксели изображения: наименьшие логические элементы двумерного цифрового изображения в растровой графике, а также физические элементы светочувствительной матрицы и элементы матрицы дисплеев, формирующих изображение. Пиксель представляет собой неделимый объект прямоугольной или круглой формы, характеризуемый определенным видом окраски [9].

Целью работы является разработка методики экспресс-анализа микроструктуры поверхности пористого кремния, а задачей данных исследований служит мониторинг поверхности структуры пористого кремния на растровых изображениях электронной микроскопии.

Основной материал и результаты исследования. Структура поверхности пористого кремния состоит из совокупности элементов: шероховатого приповерхностного горизонтального слоя, межпорового пространства и пор. На растровых изображениях такими элементами являются пиксели изображения. Объектом экспресс-анализа служит участок изображения на растровой электронной микроскопии площадью

100 x 100 нм. В качестве параметров для экспресс-анализа были выбраны вектор яркости пикселей в трехцветном графическом стандарте изображений «BMP» и расстояние между ними.

Предлагаемый алгоритм методики экспресс-анализа микроструктуры поверхности пористого кремния предусматривает использование среды «*Photoshop CS3*» и состоит из следующих операций:

- регулирование цветового баланса для удаления нежелательных цветовых оттенков;

- проведение изменения тонального диапазона и коррекции тона путем устранения слишком светлых или темных пикселей изображения, то есть выполнение настройки светлых участков и теней или установка точек белого и черного цвета (при настройке светлых участков и теней обычно осуществляют перераспределение соответствующим образом пикселей в средних тонах);

- применение бинаризации к изображению, которая предусматривает выделение элементов изображения, отвечающих заданным границам параметра яркости, определяющего количество элементов, входящих в приповерхностный слой, то есть количество пикселей полученной площади поверхности шероховатого приповерхностного слоя и пор (порог яркости при бинаризации изображения принимают таким, при котором осуществляется визуальный скачок количества полученных пикселей на площади поверхности);

- увеличение резкости кромок на изображении (при усилении резкости возрастает контрастность соседних пикселей и возможна ситуация, когда некоторые пиксели в критических областях не будут фиксироваться);

- применение фильтров «Резкость на краях изображений» и «Контурная резкость», которые на изображении выявляют области с существенным изменением цвета и значительно повышают их резкость (инструмент «Резкость» усиливает контрастность вдоль краев области, повышая видимую резкость, и чем больше данный инструмент применяется к области, тем более резкой она становится, что позволяет сгладить тональность соседних смежных пикселей).

Растровое изображение (рис. 1,а) для анализа приповерхностного слоя было заимствовано из работы [10], где оценку формы и размеров пор в приповерхностном слое пористого кремния выполняли с использованием режима вторичной электронной эмиссии, создаваемого растровым электронным микроскопом с автоэмиссионным катодом JSM-6700F фирмы «*Jeol*», Япония, позволяющего исследовать массивные (диаметром до 200 мм) образцы с высоким разрешением. Разрешение в режиме вторичной электронной эмиссии определялось условиями проведения эксперимента и составляло 1,0 нм при ускоряющем напряжении 15 кВ и 2,2 нм при ускоряющем напряжении 1 кВ.

Пористый кремний был изготовлен на подложках монокристаллического кремния *p*-типа с кристаллографической ориентацией (100) высокой степени легирования и удельным сопротивлением 0,001...0,002 Ом·см путем электрохимического травления в электролите на основе плавиковой кислоты. Процесс травления осуществляли при комнатной температуре, плотность тока составляла 100 мА/см², длительность травления – 50 мин, толщина пленки – 160 мкм.

На рис. 1,б представлено изображение, подверженное конвертированию и обработке при изменении цветового баланса, тонального диапазона и коррекции тона. Также по условиям разрешения изображения (количество пикселей в 100 нм), соглас-

но уровню разрешающей способности электронного микроскопа, на данном рисунке было выделено изучаемую область.

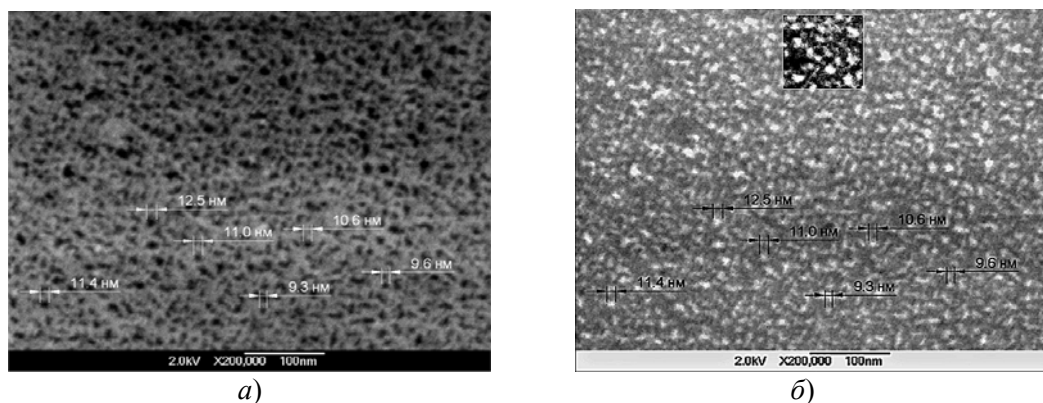


Рисунок 1 – Изображение поверхности образца, полученное в растровом электронном микроскопе: а) исходное [10]; б) изображение после конвертирования и обработки

Следующим этапом алгоритма методики экспресс-анализа служит бинаризация изображения. Бинаризованное изображение представлено на рис. 2 при разных величинах порога бинаризации (белые пиксели изображения являются порами пористого кремния, черные и серые пиксели характеризуют соответственно шероховатый приповерхностный слой и межпоровое пространство поверхности пористого кремния). В графическом стандарте «ВМР» величина яркости I_p изменяется в пределах от 0 до 255.

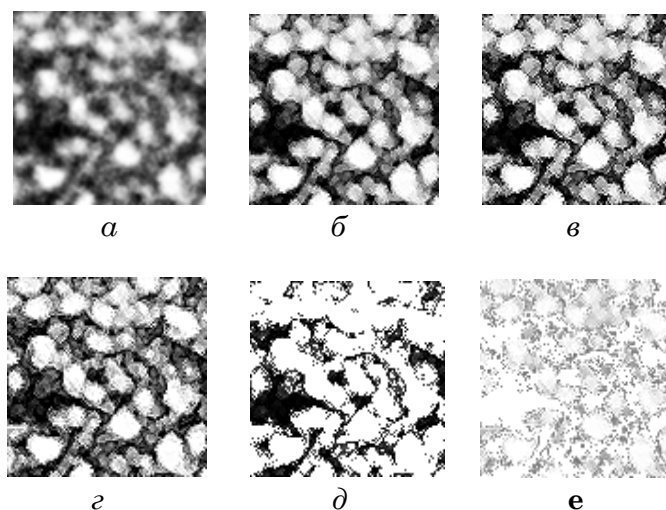


Рисунок 2 – Фрагмент изображения с улучшенными показателями по четкости и резкости: а) исходное; б) улучшенное при увеличении резкости и четкости; в) яркость +50; г) яркость +100; д) пиксели с черной окраской – поверхность пористого кремния; е) пиксели с серой окраской - межпоровое поверхностное пространство

Последующей операцией обработки поверхности пористого кремния является подсчет пикселей пор трех видов окраски: черных, белых и серых. Для этого на изображении были выделены черные пиксели (рис. 2,д) и при помощи программы «Photoshop CS3» выполняли их подсчет на персональном компьютере в окне «Журнал наблюдений» (рис. 3). Затем указанную операцию осуществляли для серых пикселей (рис. 2,е).

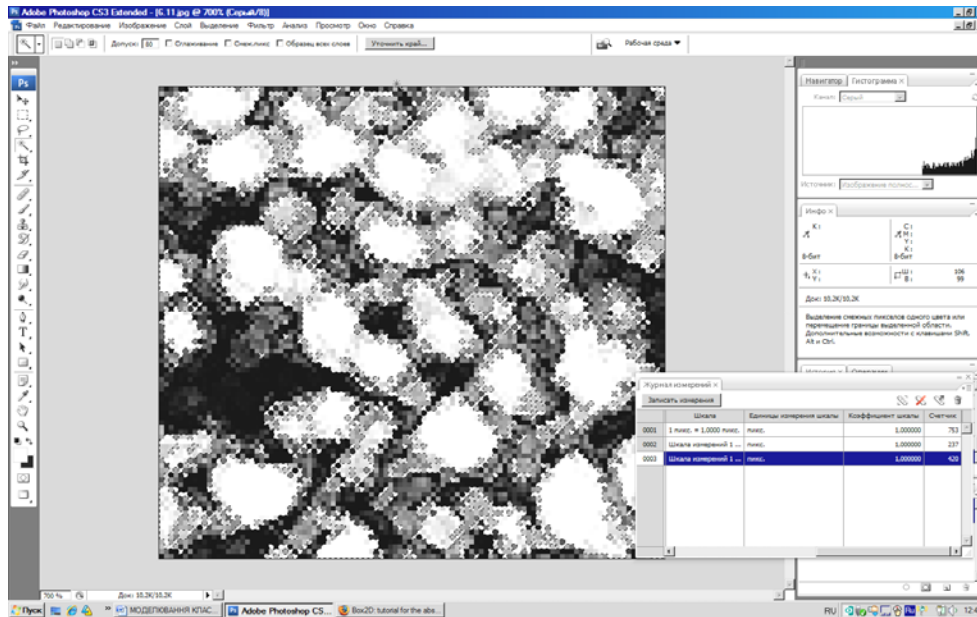


Рисунок 3 – Подсчет пикселей пор на обработанном фрагменте изображения

Для анализируемого примера получены следующие численные характеристики микроструктуры пористого кремния:

- при размере растрового изображения исследуемого объекта, равном 100 x 100 нм, зафиксировано 106 × 99 пикселей в 3,74 × 3,49 см пространства экрана монитора;
- яркость изображения +100;
- количество распознанных пикселей шероховатого приповерхностного слоя – 237 черных пикселей (площадь слоя – 248,71 нм²);
- количество распознанных пикселей межпорового пространства – 753 серых пикселей (площадь пространства – 790,1982 нм²).

В качестве количественных характеристик пористой структуры кремния рассматривают распределение плотности пор по радиусу поры как меру упорядоченности, величина которой для данного объекта составляет ≤ 4 поры, и средний радиус поры 10,86 нм. Характеристику однородности распределения пор оценивают путем вычисления отношения среднеквадратического отклонения σ_x относительно среднего значения для минимального расстояния между порами x_i :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (1)$$

где \bar{x} – среднее значение для минимального расстояния между порами; x_i – минимальное расстояние между порами для i -ой области; n – количество исследуемых областей.

Для анализируемого примера величина среднеквадратического отклонения σ_x составляет 0,6. Из этого следует, что структура является достаточно неоднородной для минимального значения между порами.

Выводы. Предложенная методика экспресс-анализа пористой структуры по растровым изображениям электронной микроскопии позволяет выполнить измерение параметров изображений пористого материала, а также расчет на их основе ряда численных характеристик исследуемой пористой структуры, в частности, площади приповерхностного слоя пористого кремния и однородности пористой структуры.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Исследование однородности структурных параметров пористых оксидных наносистем, полученных методом электрохимического травления [Текст] / Ю. М. Канагеева, Н. Е. Преображенский, В. А. Мошников, А. И. Румянцева // Физика диэлектриков (диэлектрики-2008) : материалы XI междунар. научн.-техн. конф., 3-7 июня 2008 г. Санкт-Петербург. – С.Пб. : РГПУ им. А.И. Герцена, 2008. – С. 238-240.
2. Синтез нано- и микропористых структур электрохимическими методами [Текст] / А. В. Афанасьев, В. А. Ильин, В. А. Мошников и др. // Биотехносфера. – 2011. – № 1-2 (13-14). – С. 39-45.
3. *Леньшин, А. С.* Исследование удельной поверхности перспективных пористых материалов и наноструктур методом тепловой десорбции азота [Текст] / А. С. Леньшин, Е. В. Мареева // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета. – 2011. – № 6. – С. 9-16.
4. *Павлишенко, Б. М.* Векторизація кластерів на растрових зображеннях електронної мікроскопії [Текст] / Б. М. Павлишенко // Вісник Львівського університету. Серія фізична. – 2007. – Вип. 40. – С. 117-121.
5. *Павлишенко, Б. М.* Комбіновані алгоритми аналізу кластерних структур на растрових зображеннях [Текст] / Б. М. Павлишенко // Вісник Львівського університету. Серія фізична. – 2009. – Вип. 44. – С. 93-98.
6. *Павлишенко, Б. М.* Нелінійна фільтрація та кластеризація растрових зображень електронної мікроскопії [Текст] / Б. М. Павлишенко, Р. І. Шувар // Теоретична електротехніка. – 2010. – Вип. 61. – С. 109-112.
7. *Хохлов, А. Г.* Использование методов растровой электронной микроскопии и ЯМР-криопорометрии для оценки размеров пор в пористом кремнии [Текст] / А. Г. Хохлов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2008. – № 12. – С. 90-93.
8. *Спивак, Ю. М.* Определение параметров пористой структуры в por-Si и $\text{por-Al}_2\text{O}_3$ путем компьютерной обработки данных растровой и атомно-силовой микроскопии [Текст] / Ю. М. Спивак // Молодой ученый. – 2012. – № 5. – С. 1-4.
9. ГОСТ 27459-87 Системы обработки информации. Машинная графика. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1988-01-07. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 10 с.
10. О некоторых возможностях оценки структуры нанокристаллических пористых полупроводниковых сред [Текст] / Р. Р. Валиуллин, Л. А. Головань, С. В. Заботнов и др. // Сорский образовательный журнал. Физика. – 2004. – Том 8, № 1. – С. 108-115.

Стаття надійшла до редакції 05.10.2012 р.
Рецензент, проф. Т.В. Критська