

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОПОЛОГИИ СЛОЕВ НАНО- И МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

**А.М. Каменский, А.В. Ушаков,  
С.Н. Баршутин, В.Н. Чернышов**

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор Д.Ю. Муромцев*

**Ключевые слова и фразы:** интерферометрия; компьютерная обработка изображений; нано- и микроэлектронные структуры.

**Аннотация:** Разработан метод поэтапной компьютерной обработки цифровых изображений интерферограмм для определения топологических характеристик микроэлектронных структур. Данный метод позволяет устанавливать параметры микроэлектронных структур с целью контроля технологических процессов изготовления нано- и микроэлектронных элементов.

На сегодняшний день актуальной является проблема идентификации наноструктурных образований (НСО) в различных средах, а также определения их концентрации. Данную задачу предлагается решать с помощью применения микроэлектронных элементов (МЭ) с НСО, действие которых основывается на резонансно-туннельном эффекте. Этот способ позволяет осуществлять контроль концентрации наноструктур в режиме реального времени, что является значимым фактором для технологических процессов получения материалов, содержащих наноструктурные образования.

Создаваемые микроэлектронные элементы обладают многослойной конфигурацией. Квантовые характеристики данных МЭ определяются размерами его составных компонентов. Таким образом, первостепеннейшей задачей является возможность контроля и измерения толщины наносимых слоев пленок. При этом приоритет отдается методам неразрушающего контроля, к которым в том числе относится интерференционная

---

Каменский Антон Михайлович – аспирант кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции», e-mail: antkamidiv@gambler.ru; Ушаков Александр Васильевич – аспирант кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; Баршутин Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология»; Чернышов Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции», ТамбГТУ, г. Тамбов.

микроскопия. Бесконтактное измерение толщины слоев материалов снижает нежелательное влияние на исследуемые объекты и обеспечивает эффективность получаемой информации.

В силу своей доступности для исследования размерности напыляемых пленок использовался микроинтерферометр Линника МИИ-4, у которого в качестве источника света применялся лазер, испускающий монохроматическое излучение в красном спектре с длиной волны  $\lambda = 682$  нм. Регистрация получаемой интерферограммы осуществлялась видеокамерой с разрешением 1,3 Мп, направленной в окулярный или фотографический канал интерферометра, что обеспечивало достаточную детальность результирующего изображения.

Полученные интерферограммы обрабатывались с целью повышения их качества для дальнейшего определения параметров интерференционной картины. Процесс улучшения качества изображения состоял из нескольких последовательных стадий, результатом которых являлся препарат, подходящий для поиска линий экстремумов интерференционных полос, а также других необходимых операций. Для обработки использовались методы локально-адаптивной нелинейной фильтрации. Это существенно облегчало дальнейший процесс работы с изображением интерферограммы. После этого осуществлялось определение линий экстремумов с последующим вычислением на их основе значений ширины и искривления интерференционных полос.

Остановимся и подробнее рассмотрим один из самых важных этапов обработки изображения интерферограммы, от которого зависит точность дальнейших операций обработки интерференционной картины и последующих расчетов, – подготовительный этап. Стадия подготовки изображения состоит из нескольких последовательных шагов. Исходное изображение интерференционной картины сегментируется с получением точек двух сортов, относящихся к области интерференционных полос и к области фона. При этом значения интенсивности пикселей будут равны 1 и 0 соответственно. Узким местом на данном этапе обработки является определение порога для выполнения бинаризации интерферограммы. Методы с использованием глобальных значений порога, вычисляемых на основе данных всего изображения, не дают удовлетворительных результатов, особенно для интерферограмм, зашумленных различными помехами, к которым можно отнести неоднородные или изменяющиеся яркости фона или его сложную текстуру. Поэтому было предложено использование метода сегментации изображения с локальным адаптивным порогом.

Данный адаптивный алгоритм пороговой обработки базируется на идее сопоставления уровня яркости преобразуемого пикселя со значениями локальных средних, вычисляемых в его окружении. Пиксели изображения обрабатываются поочередно путем сравнения их интенсивности со средними значениями яркости в окнах размером  $(2r+1) \times (2r+1)$  с центрами в точках  $f_l$  ( $l = 0, \dots, 7$ ).

Если значение 1 соответствует элементу объекта, а 0 – элементу фона в результирующем бинарном изображении, то значение преобразованного

пикселя  $f_l(x, y)$  становится равным 1 только тогда, когда для всех  $l = 0, \dots, 7$  выполняется условие

$$f_l - f(x, y) > t,$$

где  $t$  – порог бинаризации;  $f_l = \frac{1}{(2r+1)^2} \sum_{-r \leq i, j \leq r} f(x_l + i, y_l + j)$  – средняя локальная яркость в точке с координатами  $(x_l, y_l)$ ;  $f(x_l + i, y_l + j)$  – значение яркости в окрестности точки  $f_l$  радиусом  $r$ ;  $f(x, y)$  – интенсивность в точке рассмотрения с координатами  $(x, y)$ .

Автоматическое адаптивное определение величины локального параметра  $t$  вместо использования глобального значения позволяет устранить ошибки порогового преобразования. Параметр  $t$  определяется в соответствии с алгоритмом, устанавливающим его исходя из значений интенсивности точек исследуемой области:

1) в окне  $(2r+1) \times (2r+1)$  с центром в преобразуемом пикселе  $f(x, y)$  вычисляются максимальное и минимальное значения интенсивности изображения:

$$f_{\max} = \max_{-r \leq i, j \leq r} f(x+i, y+j);$$

$$f_{\min} = \min_{-r \leq i, j \leq r} f(x+i, y+j);$$

2) рассчитываются величины отклонения средней интенсивности пикселей от экстремальных по области обработки значений:

$$\Delta f_{\max} = |f_{\max} - \bar{f}(x, y)|;$$

$$\Delta f_{\min} = |f_{\min} - \bar{f}(x, y)|,$$

где  $\bar{f}(x, y)$  – среднее значение по окну рассмотрения;

3) вычисляются коэффициенты, используемые при расчете порога бинаризации  $t$ :

$$k_{\max} = \frac{\Delta f_{\max}}{\Delta f_{\max} + \Delta f_{\min}};$$

$$k_{\min} = \frac{\Delta f_{\min}}{\Delta f_{\max} + \Delta f_{\min}}.$$

Далее непосредственно определяется значение параметра. В данной ситуации возможны следующие три варианта.

Если  $\Delta f_{\max} > \Delta f_{\min}$ , то локальное окно  $(2r+1) \times (2r+1)$  наиболее вероятно содержит больше локальных низких значений яркости.

Если  $\Delta f_{\max} < \Delta f_{\min}$ , то в локальном окне  $(2r+1) \times (2r+1)$  содержится больше локальных высоких значений яркости.

В вышеизложенных двух случаях параметр  $t$  находится как

$$t = \alpha(k_{\max} f_{\min} + k_{\min} \bar{f}(x, y)),$$

где  $\alpha$  – подстроечный параметр.

Если  $\Delta f_{\max} = \Delta f_{\min}$ , то следует увеличить размер окна до  $(2r+3) \times (2r+3)$  и повторить операции, начиная с первого шага. Если же и в этом случае выполняется условие  $\Delta f_{\max} = \Delta f_{\min}$ , то пиксель  $f(x, y)$  или относится к фону, или же искомый параметр  $t$  определяется как

$$t = \alpha \bar{f}(x, y).$$

Коэффициент  $\alpha$  является глобальным параметром для всего изображения и вычисляется в зависимости от диапазона занимаемых значений яркости следующим образом

$$\alpha = \begin{cases} 0,2, & v < 0,2; \\ v, & 0,2 \leq v \leq 0,8; \\ 0,8, & v > 0,8, \end{cases}$$

где  $v = 1 - \sqrt{\frac{(\bar{f} - f_m)^2}{f_m^2}}$ ;  $f_m = \frac{1}{2}(f_{\max} + f_{\min})$  – среднее максимального и минимального значения интенсивности изображения;  $\bar{f}$  – среднее значение яркости по всей картине интерферограммы.

Стоит также отметить, что наилучшие результаты обработки будут достигаться при значении радиуса области локального окна  $r$ , равном средней толщине интерференционной полосы.

Рассмотренный алгоритм позволяет определить значения пороговых величин для изображений интерферограмм, содержащих зависящий от сигнала шум и имеющих сложную структуру фона или малый контраст.

На основании картины полученного сегментированного изображения для каждого пикселя интерферограммы, относящегося к области полос, ищется коэффициент связанности, характеризующий его расположение на интерференционной линии. Вычисление данного коэффициента осуществляется по области, размер и конфигурация которой формируется при поиске ее границ по  $L = 8$  направлениям, соответствующим значениям углов  $\frac{2\pi l}{L}$  относительно прямой, проходящей через точку рассмотрения параллельно горизонтальной оси изображения. Для каждого направления  $l$ ,  $l = 0, \dots, L-1$ , поиск размера области  $r_l$  осуществляется итеративным методом. Начальной точкой поиска является рассматриваемый пиксель, и при этом значение радиуса области в данном направлении равно  $r_l = 0$ . Далее радиус  $r_l$  увеличивается на шаг  $\Delta r_l = 1$  до тех пор, пока не будет выполнено условие остановки

$$|f_t(r_l + \Delta r_l) - f_t(r_l)| = 1,$$

где  $f_t(r_l + \Delta r_l)$  – значение интенсивности сегментированного изображения в следующей по направлению точке;  $f_t(r_l)$  – значение интенсивности сегментированного изображения в текущей точке. Таким образом, по-

иск осуществляется до тех пор, пока не будет выполнен переход с области полос на область фона.

Радиус области рассмотрения после расчета значений по всем направлениям берется как среднее значение по всем направлениям

$$r(x, y) = \sum_{l=1}^{L-1} r_l, \quad r(x, y) = r,$$

или как минимальное по всем значениям

$$r(x, y) = \min_{0 \leq l \leq L-1} r_l.$$

На основании полученного значения  $r$  формируется область рассмотрения  $(2r+1) \times (2r+1)$ , в которой подсчитывается число пикселей, относящихся к области интерференционных полос. Коэффициент при этом находится как отношение полученного числа к общему количеству пикселей информативной области интерферограммы

$$k(x, y) = \frac{n}{N},$$

где  $n$  – число пикселей интерференционной картины в области  $(2r+1) \times (2r+1)$ ;  $N$  – число пикселей линий на изображении;  $(x, y)$  – координаты точки рассмотрения.

Таким образом, для каждого пикселя изображения имеем пару параметров  $r(x, y)$  и  $k(x, y)$ , которые будут использоваться для последующего преобразования изображения.

Далее осуществляется расчет средних значений интенсивностей  $f_l(x, y)$ ,  $l = 0, \dots, L-1$ ,  $L = 4$  по различным сечениям в точке рассмотрения с координатами  $(x, y)$  по области с размером  $r(x, y)$

$$f_l(x, y) = \frac{\sum_{-r \leq i, j \leq r} f(x+i, y+j)k(x+i, y+j)}{\sum_{-r \leq i, j \leq r} k(x+i, y+j)},$$

где  $\sum_{-r \leq i, j \leq r}$  – обозначение суммирования только по элементам, лежащим в направлении  $l$ , и дополнительно вычисляется усредненное значение коэффициента по направлению  $l$

$$k_l(x, y) = \frac{\sum_{-r \leq i, j \leq r} k(x+i, y+j)}{M},$$

где  $M = \left[ \sqrt{8r^2} \right]$  – число точек в направлении  $l$  на отрезке, ограниченном значениями размерности  $r(x, y)$ . Знак  $[ ]$  обозначает операцию взятия целого числа.

Также для снижения влияния аддитивного шума на этапе получения бинарного препарата можно использовать медианную фильтрацию для

расчета средних значений интенсивности по направлениям в точке с координатами  $(x, y)$

$$f_l(x, y) = \text{med}_{-r \leq i, j \leq r} f(x+i, y+j).$$

Усредненное итоговое значение находится как

$$f^*(x, y) = \frac{\sum_{l=0}^{L-1} f_l(x, y) k_l(x, y)}{\sum_{l=0}^{L-1} k_l(x, y)}.$$

Рассмотренным выше методом формируется препарат для поиска экстремумов интерференционных линий, которые при последующей обработке дают информацию, необходимую для расчета параметров картины интерференционных полос.

Таким образом, интерференционная микроскопия дает возможность точного и относительно простого определения размеров наносимых слоев материалов для контроля технологических процессов изготовления микрорезистивных элементов.

*Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.741.12.0150 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

---

## **Determination of Layers Topology of Nano- and Microelectronic Structures with Interferential Method**

**A.M. Kamensky, A.V. Ushakov,  
S.N. Barshutin, V.N. Chernyshov**

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** computer image treatment; interferometry; nano- and microelectronic structures.

**Abstract:** The paper describes the developed method of gradual computer processing of interferogram images to determine the topological characteristics of microelectronic structures. This method enables to set the parameters of microelectronic structures in order to control the manufacturing processes of nano- and microelectronic components.

---

© А.М. Каменский, А.В. Ушаков,  
С.Н. Баршутин, В.Н. Чернышов, 2011