

Фрактальная геометрия поверхностного потенциала электрохимически осажденных пленок платины и палладия

© Н.А. Торхов[¶], В.А. Новиков*

Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов,
634050 Томск, Россия

* Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

(Получена 23 декабря 2008 г. Принята к печати 30 декабря 2008 г.)

Поверхностные потенциалы электрохимически осажденных тонких пленок палладия и платины сильно неоднородны и отражают зернистую структуру рельефов их поверхностей. Значения пространственных размерностей Хаусдорфа–Безиковича поверхностных потенциалов этих пленок значительно превышают топологическую размерность их проекций, что свидетельствует об их фрактальной геометрии. Было установлено, что поверхности пленок платины и палладия отличаются не только своим разбросом абсолютных значений неоднородностей поверхностных потенциалов, но и формой и характером их распределения. Это оказывает существенное влияние на способ формирования (геометрию) их потенциальных рельефов и на значения их фрактальных размерностей. Кроме того, фрактальная геометрия потенциальных рельефов поверхностей этих пленок приводит к тому, что изменение полного электрического заряда их поверхностей происходит не пропорционально квадрату изменения линейных размеров исследуемых участков, как в двумерном случае, а значительно медленнее — пропорционально изменению их линейных размеров в степени $(4 - D_f)$, где $2 < D_f < 3$. В результате показано, что для точного проектирования приборов с металлическими элементами субмикронных и наноразмеров на основе тонких пленок платины и палладия необходимо учитывать и их фрактальную геометрию.

PACS: 68.35.bd, 73.30.+y, 68.35.Ct, 68.37.Ps

1. Введение

В работах [1–3] было показано, что пространственный и потенциальный рельефы реальных поверхностей GaAs имеют фрактальную геометрию, фрактальная размерность ($D_f > 2$) которых значительно превышает их топологическую размерность $D_t = 2$, что, как было показано в [3,4], может оказывать значительное влияние на статические электрические характеристики контактов металл–полупроводник (МП). Из [1–3], в частности, следует, что фрактальность одновременно пространственного и потенциального рельефов поверхности GaAs указывает на единую физическую природу их формирования. Кроме полупроводников, большое значение для полупроводниковой наноэлектроники имеют тонкие металлические пленки, используемые как в качестве активных элементов полупроводниковых приборов — барьерные и омические контакты, обкладки конденсаторов, так и в качестве соединительной металлизации. В микроэлектронике используются не только их тепловые и механические свойства, определяющие качество теплоотвода, прочность балочных элементов и несущих конструкций, но и в полной мере одновременно с этим их электрофизические свойства: проводимость и работа выхода, которые, согласно общим физическим представлениям, связаны с поверхностным потенциалом металла. Ранее в работах [5–8] было показано, что поверхности различных металлов на субмикронном и

наноуровнях, так же как и поверхности полупроводников [1–3], являются фрактальными объектами. Было обнаружено, что фрактальная геометрия металлических поверхностей напрямую связана с их механическими свойствами. При этом остается практически неизученным влияние фрактальной геометрии металлических поверхностей на их электрофизические свойства: проводимость и поверхностный потенциал.

В связи с этим в данной работе с использованием понятия фрактальных броуновских поверхностей исследуются геометрия потенциальных рельефов поверхностей электрохимически осажденных тонких пленок платины и палладия, их однородность, а также определяются значения их фрактальных размерностей.

2. Методика эксперимента

В работе исследовались полученные электрохимическим осаждением в ультразвуке на эпитаксиальный слой n^+ -GaAs(100) металлические слои платины Pt и палладия Pd толщинами $d_{Pt} = 0.2$ и $d_{Pd} = 0.1$ мкм. Концентрация носителей заряда в n^+ -слое составляла $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Электрохимическое осаждение платины проводили из электролита состава (г/л): $\text{H}_2\text{PtCl}_6 : \text{N}_2\text{HPO}_4 : (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_3 = 9.52 : 200 : 20$ при плотности тока 50 А/дм^2 , температуре 50°C и скорости осаждения $0.18\text{--}0.20 \text{ мкм/мин}$. Электрохимическое осаждение палладия проводили из электролита состава (г/л): $\text{PdCl}_2 : \text{N}_2\text{HPO}_4 : (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 = 17 : 100 : 20$ при плотности тока 0.5 А/дм^2 , температуре 25°C и скорости

[¶] E-mail: trkf@mail.ru

осаждения 0.13 мкм/мин. Непосредственно перед электрохимическим осаждением поверхность эпитаксиального слоя n^+ -GaAs обрабатывалась в сернокислотном растворе (г/л) $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 10$ ($\text{pH} = -0.5$) в течение 30 с с последующей промывкой в деионизованной воде. Для обеспечения хорошего электрического контакта и предотвращения накопления электрического заряда на поверхности n -GaAs со стороны подложки формировался омический контакт электрохимическим осаждением сплава AuGe толщиной 0.2 мкм с последующим отжигом в атмосфере водорода при температуре 400°C в течение 5 мин. Во время электрохимического осаждения пленок платины и палладия омический контакт защищался непроводящим лаком.

Исследования потенциалов поверхностей платиновых и палладиевых пленок проводились путем измерения контактной разности потенциалов (КРП) $\Delta\varphi$ между потенциалом иглы кантилевера φ_p и исследуемой поверхностью φ_s металлической пленки с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) „Solver-HV“ на воздухе при нормальных условиях по двухпроходной методике в полуконтактном режиме [4,9]:

$$\Delta\varphi = \varphi_p - \varphi_s. \quad (1)$$

Методика измерения пространственного и потенциального рельефов поверхности была подробно описана в предыдущих работах [1–3] и во многом аналогична описанной в [10]. В АСМ-измерениях использовались Si-кантилеверы марки NSG10/W₂C, покрытые токопроводящим покрытием из W₂C толщиной 30 нм и работой выхода $q\varphi_p = 4.92$ эВ [4]. Геометрические размеры иглы: радиус острия 30–35 нм, угол конуса 21° , длина иглы 15 мкм и ширина балки 35 мкм — обеспечивали минимальное влияние ее размеров на точность измерения (так называемое „приборное влияние“) [10]. Шаг сканирования (величина измерительного масштаба) $l = a/N = a\delta$ определялся выбором линейных размеров области сканирования $a \times a$ и используемым числом шагов $N = 256$. Далее в работе, если это не оговорено специально, вместо термина „КРП“ для удобства будем применять термин „потенциал“.

Полагая, что форма потенциальной поверхности $S(x, y, \varphi(x, y))$, образованной пространственными координатами в плоскости (x, y) и значениями потенциала $\varphi(x, y)$ по оси z , подчиняется законам фрактальной геометрии, мы можем использовать как для ее анализа, так и для анализа неровностей пространственного рельефа, общие представления о фрактальных мерах. Напомним, что фракталом называется структура, состоящая из бесконечного количества множеств элементов, которые в каком-то смысле подобны целому. Фрактальные меры нашли широкое применение для исследования распределения различных физических величин на геометрических носителях, какими могут являться, к примеру, рельеф, фазовый состав поверхности и т.д. [11,12].

В качестве одной из таких физических величин, например, можно рассматривать потенциал поверхности $\varphi(x, y)$. Согласно [11,12], фрактальная мера может быть выражена через множество самоподобных элементов. В работе [13] было показано, что любое множество, покрытое M непересекающимися элементами, самоподобно, если его коэффициент подобия

$$r(N) = \left(\frac{1}{M}\right)^{1/D_s}, \quad (2)$$

где D_s — размерность подобия. В общем случае размерность подобия D_s определяется выражением

$$D_s = -\frac{\ln M}{\ln[r(M)]}, \quad (3)$$

где M — количество элементов заполнения, а $r(M)$ — коэффициент подобия, равный отношению изменению размеров измерительного масштаба [13].

Важной характеристикой реальных самоаффинных (мультифрактальных) объектов, и в частности поверхностей, является так называемый предел локального приближения L — значение измерительного масштаба, при превышении которого исчезают свойства самоподобия элементов (неровностей поверхности) самоподобных множеств (2). В связи с этим определение фрактальной размерности участков реальной поверхности GaAs происходило в локальном приближении при величине измерительного масштаба l много меньше L , когда размеры элементов множеств удовлетворяют условию самоподобия. Как было показано в работах [1,3,11–13], при выполнении условия $l \leq L$ самоподобное множество, в данном случае неровности поверхности, имеет фрактальную геометрию и обладает уникальными геометрическими свойствами, присущими только фрактальным объектам. При $l > L$ размеры неровностей перестают удовлетворять условию самоподобия, и мы попадаем в область так называемого глобального приближения, когда значение фрактальной размерности (размерности Хаусдорфа–Безиковича) становится равным топологической размерности двумерной поверхности $D_f \approx D_t = 2$. В этом случае свойства фрактальности исчезают и поверхность приобретает обычные геометрические свойства двумерных объектов, топологическая размерность D_t которых равна 2.

Фрактальный анализ распределения локальных неоднородностей поверхности потенциального рельефа эпитаксиального n -GaAs проводился с использованием трех известных способов [13–17], основанных на анализе:

- 1) площади поверхности,
- 2) контура ее горизонтального сечения,
- 3) на определении размерности подобия.

Этим трем способам соответствуют три вида определяемых фрактальных размерностей: фрактальная размерность поверхности D_f , фрактальная размерность

контура D_c и фрактальная размерность подобия D_s , которые связаны между собой соотношением

$$D_f = D_c + 1 = D_s + 1. \quad (4)$$

Для определения фрактальной размерности D_f поверхности потенциального рельефа использовался метод триангуляции [13]. В данном случае в качестве измеряемой поверхности использовалась безразмерная поверхность \tilde{S} , получаемая из поверхности $S(x, y, \varphi(x, y))$ нормированием координат x, y и φ на единицу. В работе [17] было показано, что в локальном пределе, когда размер измерительного масштаба значительно меньше линейных размеров неровностей, значение D_f не зависит от их линейных размеров. Действительно, из (3) видно, что размерность подобия, а следовательно, и фрактальная размерность определяются в конечном итоге не абсолютными, а относительными значениями размеров самоподобных неровностей. Поэтому для определения точного значения фрактальной размерности потенциальной поверхности достаточно иметь безразмерный аналог этой поверхности \tilde{S} , относительные размеры неровностей которой только подобны оригинальной поверхности $S(x, y, \varphi(x, y))$. Для фрактальных поверхностей, согласно [13], каждому значению $\delta_i = 1/i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) соответствует свое определенное значение площади i -го предфрактала этой поверхности:

$$\tilde{S}_i = \tilde{S}_w \delta_i^{2-D_f}. \quad (5)$$

Предфрактал — это структура, состоящая из конечного количества множеств элементов, которые в каком-то смысле подобны целому. Построив зависимость $\ln \tilde{S}_i$ от $\ln \delta_i$, по углу наклона ее линейного участка можно определить величину D_f . Здесь $\tilde{S}_w = 1$ — проекция безразмерной поверхности \tilde{S} на плоскость (x, y) . Понятно, что реальная площадь поверхности может быть определена как

$$S = S_w \lim_{\delta \rightarrow 0} \delta^{2-D_f}, \quad (6)$$

где S_w — проекция реальной площади поверхности на плоскость (x, y) . Способ определения значения L методом триангуляции был подробно описан в [1] и заключается в нахождении координат точки перегиба линейного участка $\ln \tilde{S}_i$ от $\ln \delta_i$ по оси абсцисс, в которой ее наклон уменьшается, а значение D_f стремится к $D_i = 2$.

Для фрактального анализа контура потенциального рельефа использовалось его контурное изображение, полученное горизонтальным сечением плоскостью, параллельной плоскости (x, y) . В результате этого получается линейное изображение, состоящее из контуров, каждый из которых характеризуется периметром P и площадью S . Для получения достоверного значения фрактальной размерности такого контурного изображения нужно провести несколько измерений S и P для разных горизонтальных сечений. Тогда фрактальную

размерность контура D_c можно вычислить с помощью соотношения [17]

$$S(\delta) \propto [P(\delta)]^{2/D_c}, \quad (7)$$

построив зависимость $\ln S$ от $\ln P$ и аппроксимировав ее прямой. Значение D_c определяется по углу наклона этой прямой. Выражение (7) справедливо как для значений S отдельных контуров, так и для их суммарной площади. Данный способ позволяет изучать форму и характер распределения по поверхности полупроводника локальных неоднородностей с одинаковыми значениями потенциала.

Размерность подобия D_s находилась с использованием выражения (3). Для этого производилась трассировка потенциального рельефа с различными значениями измерительного масштаба δ_i . Получаемые в результате трассировки контуры представляют периметры, охватывающие различные неоднородности поверхностного потенциала, локальные размеры которых превышают δ_i . Данный метод позволяет определить размеры и форму всех (независимо от значения потенциала) локальных неоднородностей потенциала, провести их статистический анализ и закономерности их относительного расположения. Для этого подсчитывается количество всех полученных контуров M , необходимых при покрытии одного элемента при изменении измерительного масштаба в $r(M) = \delta_i/\delta_{i+1}$ раз.

Обработка рельефа исследуемых поверхностей осуществлялась с использованием прилагаемого к АСМ пакета программ.

3. Результаты исследований

На рис. 1 представлены результаты АСМ-исследования потенциального рельефа поверхности платиновой пленки (а), контура его горизонтального сечения (б) и контура трассировки (с). Среднестатистическое значение поверхностного потенциала (КРП) при этом составляло 0.360 В, что соответствует работе выхода 5.28 эВ. Хорошо видно, что потенциальный рельеф поверхности платиновой пленки неоднороден и образует ячеистую (зернистую) структуру с повышенными (границы ячеек) и пониженными (межграницные области) значениями потенциала в пределах 40 мВ (от -0.330 до -0.370 эВ). Размер ячеек (зерен) в среднем составляет 400–500 нм. Сравнение АСМ-изображений потенциального рельефа с пространственным (в целях экономии места АСМ-изображения пространственного рельефа не приведены) показало, что потенциальный рельеф практически полностью отражает пространственный: области между границами ячеек соответствуют поверхности зерен на пространственном рельефе, а границы ячеек на потенциальном рельефе соответствуют границам зерен на пространственном. При этом, согласно (1), большие значения потенциала (КРП) соответствуют меньшему

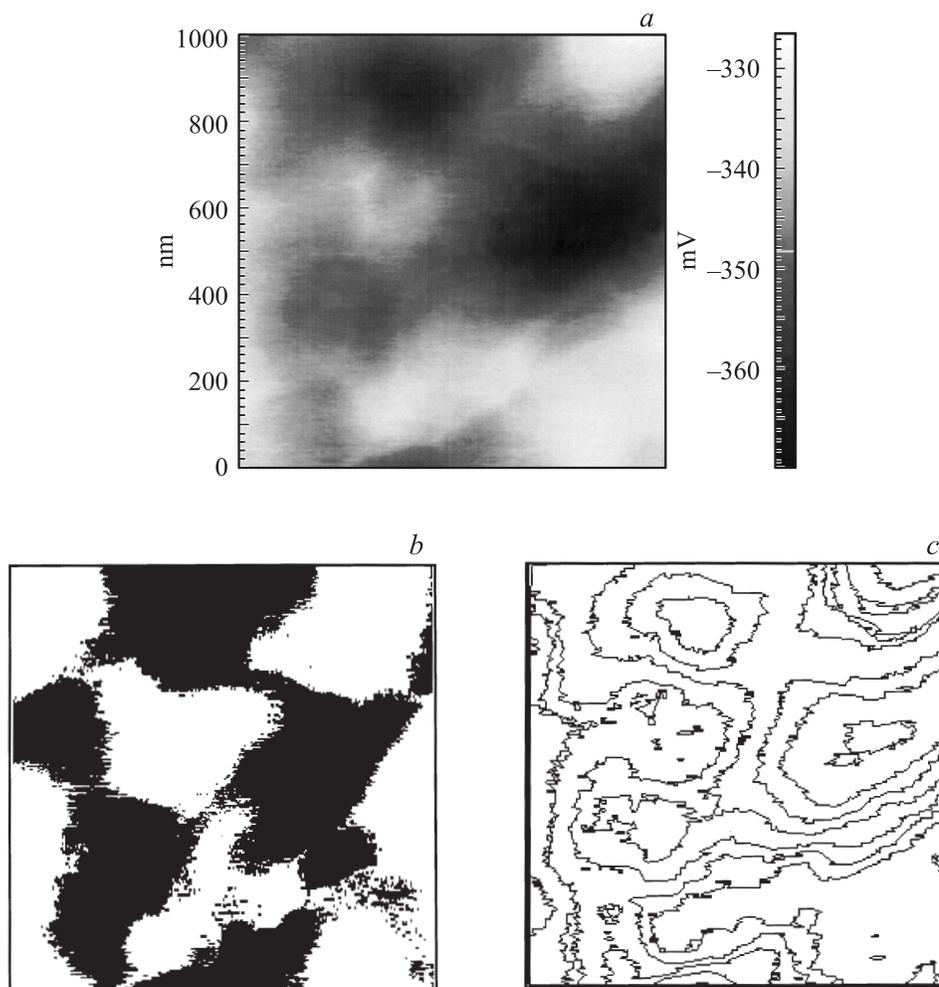


Рис. 1. Определенный АСМ-методом „Kelvin probe“ потенциал поверхности $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ электрохимически осажденной платиновой пленки толщиной 0.2 мкм : *a* — потенциальный рельеф; *b* — контурное изображение эквипотенциальных участков, полученное горизонтальным сечением при $\Delta\varphi(x, y) = \text{const}$; *c* — контурное изображение неоднородностей потенциала, полученное трассировкой по контуру потенциального рельефа.

значению работы выхода, а меньшие значения потенциала — ббльшим значениям. Из этого, в частности, следует вывод о том, что места соединения зерен — границы зерен обладают приблизительно на 40 мэВ меньшим значением работы выхода, чем свободная поверхность зерна. Определение методом триангуляции среднего значения фрактальной размерности и предела локального приближения изображенного на рис. 1, *a* потенциального рельефа дало значение $D_f = 2.273$ и $L \approx 0.2 \text{ мкм}$.

Дополнительную информацию нам дает представленное на рис. 1, *b* горизонтальное сечение потенциального рельефа. Хорошо видно, что не все свободные поверхности зерен платины имеют одинаковый потенциал. Согласно рис. 1, *b*, поверхность платиновой пленки образована зернами с повышенным (светлые области) и пониженным (темные области) значениями потенциала, который образует узор, напоминающий шахматные клетки: темные и светлые области на рис. 1, *b* чередуются между собой в плоскости (x, y) , образуя транс-

ляционную симметрию вдоль диагоналей этих клеток с периодом $400\text{--}500 \text{ нм}$. Соответствие потенциального рельефа пространственному проявляется и в том, что зерна с большими значениями потенциала поверхности расположены выше зерен с меньшими значениями потенциала. Определенная с использованием выражения (7) фрактальная размерность контура получилась равной $D_c = 1.183$.

Интересные результаты относительно формы неоднородностей и их относительного расположения дает контурное изображение, полученное трассировкой потенциального рельефа (рис. 1, *c*). Видно, что потенциальные неоднородности с повышенным („холмы“) и пониженным („впадины“) значениями потенциалов имеют достаточно протяженные размеры (сравнимые с линейными размерами сканируемого окна), плавно переходят одна в другую и образуют на потенциальной поверхности топографически ярко выраженный холмистый рельеф. Области наблюдаемых неоднородностей также соответ-

ствуют местам расположения зерен на поверхности. Определенная с использованием выражения (3) размерность подобия D_s получается равной 1.151.

На рис. 2, *a* представлено АСМ-изображение потенциального рельефа поверхности палладиевой пленки. Определенная с использованием среднего значения потенциала (КРП) поверхности -0.158 В работа выхода палладиевой пленки составила 5.078 эВ. В отличие от платины потенциальный рельеф поверхности палладиевой пленки более однороден и изменяется в меньшем интервале значений от -154 до -162 мВ. Пространственные размеры потенциальных неоднородностей значительно меньше и в среднем составляют $20-60$ нм. При этом плотность таких неоднородностей (их количество на единицу площади) на порядки превышает плотность потенциальных неоднородностей поверхности платиновой пленки. Расположение потенциальных неоднородностей на поверхности не хаотично, но в отличие от платины они расположены не в шахматном порядке, а образуют расположенные на поверхности в узлах воображаемой сетки с периодом $400-500$ нм мезоскопления размерами $400-500$ нм. Пространство между скоплениями содержит значительно меньше неоднородностей, более однородно и характеризуется меньшим значением поверхностного потенциала. Сравнение потенциального рельефа (рис. 2, *a*) с пространственным, как и в случае с платиной, показало, что места расположения скоплений совпадают с местами расположения выходящих на поверхность зерен. Наблюдаемые скопления неоднородностей отражают, судя по всему, субструктуру поверхности палладиевых зерен. Поверхность платиновых зерен более гладкая. В отличие от платины на потенциальном рельефе палладиевой пленки отсутствуют неоднородности потенциала, соответствующие границам соединения зерен. Так происходит потому, что пространственные размеры субструктурных элементов соизмеримы или равны размерам неоднородностей потенциала на границах соединения зерен. При этом зерна, расположенные выше, имеют приблизительно на 8 мВ больший потенциал, чем нижележащие зерна. Определение методом триангуляции среднего значения фрактальной размерности рельефа потенциальной поверхности дало значение $D_f = 2.689$, что значительно превышает фрактальную размерность поверхности платиновой пленки. Значение предела локального приближения при этом принимает значительно меньшее значение $L \approx 0.11$ мкм.

Представленное на рис. 2, *b* горизонтальное сечение потенциального рельефа полностью подтверждает сделанные нами наблюдения. Видно, что контуры горизонтального сечения потенциального рельефа описывают как отдельные неоднородности, так и их скопления. Узор горизонтального сечения потенциального рельефа пленки палладия (рис. 2, *b*) отличается от узора горизонтального сечения потенциального рельефа платиновой пленки тем, что темные и светлые области с пониженным и повышенным потенциалом не однородны, а образованы скоплениями мелких неоднородностей $20-60$ нм.

Определенная с использованием выражения (7) фрактальная размерность контура неоднородностей потенциального рельефа палладиевой пленки оказалась равной $D_c = 1.661$.

Контурное изображение, полученное трассировкой неоднородностей потенциального рельефа палладиевой пленки (рис. 2, *c*), также подтверждает полученные выше выводы. Отчетливо видны пространственные контуры скоплений неоднородностей, расположенные на поверхности чередующимися рядами с периодом $400-500$ нм. В отличие от платины неоднородности потенциала палладиевой поверхности не переходят плавно одна в другую, а, как указывалось выше, образуют скопления. При этом области скоплений неоднородностей в основном соответствуют местам расположения зерен на поверхности пленки и отражают, согласно проведенным исследованиям, субструктуру поверхности зерен. Определенная с использованием выражения (3) размерность подобия D_s равна 1.770 .

4. Обсуждение результатов

Сравнение потенциальных рельефов пленок палладия и платины с рельефами своих поверхностей показало, что потенциальные неоднородности связаны с формой рельефа и отражают его зернистую структуру. В работе [18] было показано, что форма неоднородностей потенциального рельефа золотой пленки также отражает ее зернистую структуру. Было установлено, что форма и относительное расположение потенциальных неоднородностей не произвольны, а удовлетворяют условию самоподобия (2). Наличие подобия в характере формирования неоднородностей и их скоплений свидетельствует о фрактальной геометрии формы потенциальных рельефов исследуемых металлических поверхностей. Хорошо видно, что поверхностные потенциалы пленок платины и палладия отличаются не только по абсолютной величине и степени неоднородности (разброс $\Delta\varphi$), но и формой и характером распределения этих неоднородностей, что оказывает существенное влияние на способ формирования их потенциальных рельефов и на значения их фрактальных размерностей.

Определенные методом триангуляции значения фрактальных размерностей пространственных рельефов этих пленок дали значения $D_f^s(\text{Pt}) = 2.51 \pm 0.01$ и $D_f^s(\text{Pd}) = 2.48 \pm 0.01$. Значение шероховатости для платины при этом составило 6.86 нм, а для палладия — 1.81 нм. Напомним, что значения фрактальных размерностей потенциальных рельефов платиновой и палладиевой пленок равны $D_f^{\text{pot}}(\text{Pt}) = 2.273 \pm 0.01$ и $D_f^{\text{pot}}(\text{Pd}) = 2.689 \pm 0.01$. Наблюдаемые различия в значениях фрактальных размерностей пространственных и потенциальных рельефов вызваны, вероятно, влиянием на потенциал субструктуры зерен. Так, зерна палладия менее однородны и, согласно АСМ-исследованиям, также имеют фрактальную субструктуру, которая и

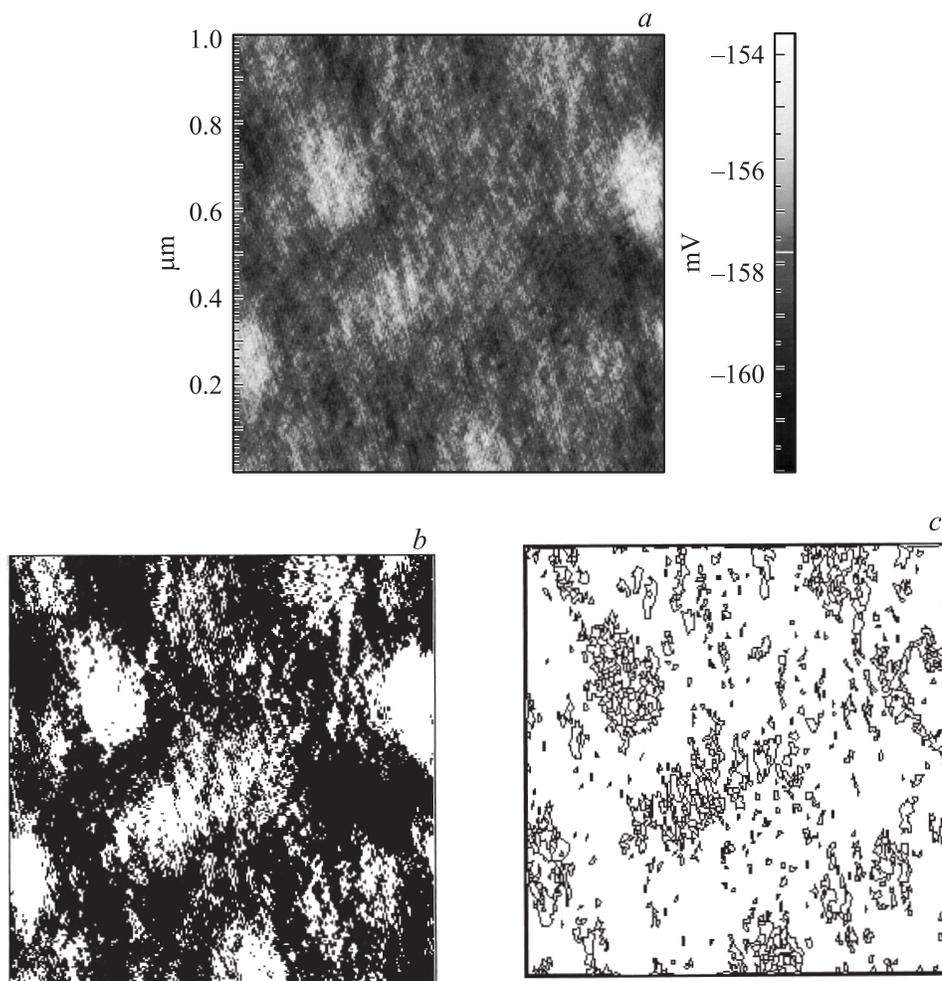


Рис. 2. Определенный АСМ-методом „Kelvin probe“ потенциал поверхности $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ электрохимически осажденной пленки палладия толщиной 0.1 мкм: *a* — потенциальный рельеф; *b* — контурное изображение эквипотенциальных участков, полученное горизонтальным сечением при $\Delta\varphi(x, y) = \text{const}$; *c* — контурное изображение неоднородностей потенциала, полученное трассировкой по контуру потенциального рельефа.

оказывает сильное влияние на потенциал поверхности. В результате фрактальная размерность потенциального рельефа имеет большее, чем рельеф поверхности, значение фрактальной размерности. В случае с платиной ситуация прямо противоположная. Фрактальная размерность рельефа поверхности больше фрактальной размерности потенциального рельефа. Пространственный рельеф более неоднороден, чем потенциальный. Это, согласно АСМ-исследованиям, происходит потому, что зерна платины более однородны и практически не имеют ярко выраженной субструктуры, которая могла бы оказывать влияние на потенциальный рельеф поверхности. Ввиду того что размеры зерен платиновой пленки больше, фрактальные свойства ее поверхности начинают проявляться гораздо раньше при $l \leq 0.2 \text{ мкм}$, тогда как фрактальные свойства пленки палладия начинают проявляться только при $l \leq 0.11 \text{ мкм}$.

Полученные с использованием трех независимых способов значения размерностей Хаусдорфа–Безиковича

D_f , D_c и D_s с достаточной точностью удовлетворяют выражению (4), что указывает на единую природу формирования фрактальных рельефов исследуемых потенциальных поверхностей пленок платины и палладия.

Так, полученные в работе значения размерности контура $D_c = 1.183$ и подобия $D_s = 1.151$ для поверхностного потенциала платиновой пленки позволяют провести сравнение с известной фрактальной кривой под названием „триадной кривой Коха“, размерность подобия которой имеет относительно близкое значение 1.263. Способ построения триадной кривой Коха хорошо известен [13]. Каждое последующее поколение предфрактала триадной кривой Коха получается при замене каждого прямолинейного звена четырьмя ($M = 4$) уменьшенными в 3 раза ($r = 3$) образующими элементами.

Потенциальный рельеф палладиевой пленки более неоднороден и имеет большее значение размерности контура $D_c = 1.661$ и подобия $D_s = 1.770$, которое позволяет провести сравнение с другой известной фрак-

тальной кривой Мандельброта–Гивена, размерность подобия которой имеет близкое значение 1.89. Способ построения фрактальной кривой Мандельброта–Гивена происходит следующим образом. Образующий элемент в виде незамкнутой петли в форме буквы „П“ делит прямолинейный отрезок на три равные ($r = 3$) части. Этот отрезок проходит через середины боковых сторон „П“, что приводит к образованию 8 линейных отрезков ($M = 8$). Размерность подобия, согласно (3), получается равной $D_s = 1.89$. В результате видно, что наблюдаемые различия в значениях величин фрактальных размерностей кривых Кох и Мандельброта–Гивена определяются способом (формой) построения образующего элемента. Таким образом, и различия в значениях фрактальных размерностей потенциальных рельефов пленок платины и палладия также определяются формой и характером относительного расположения их неоднородностей.

Полученные результаты позволяют сделать еще один интересный вывод. Так, из уравнения Пуассона следует, что дифференциальный характер распределения потенциала отражает характер распределения плотности заряда на исследуемом участке поверхности. Поэтому интегральная величина заряда поверхности (полный заряд) будет определяться фрактальным характером распределения неоднородностей потенциального рельефа этого участка. В работе [1] было показано, что фактическая площадь фрактальной поверхности GaAs(100), а также форма, количество и величина неоднородностей ее поверхностного потенциала могут изменяться не пропорционально квадрату изменения линейных размеров, а значительно медленнее — пропорционально степени $(4 - D_f)$ или, согласно (7), пропорционально $2/D_c$. Из полученных результатов следует, что и для металлических пленок Pt и Pd изменение интегральной величины заряда фрактальной поверхности будет происходить по такому же степенному закону — пропорционально изменению линейных размеров исследуемого участка поверхности в степени $(4 - D_f)$, где $2 < D_f < 3$ — фрактальная размерность потенциального рельефа. Таким образом, становится понятно, что для точного проектирования приборов с металлическими элементами субмикронных и наноразмеров необходимо учитывать их фрактальную геометрию.

Измеренные значения работ выхода Pt и Pd несколько меньше известных значений. Наблюдаемые отличия в значениях работ выхода можно объяснить тем, что потенциалы поверхностей исследуемых металлизаций не являются постоянными величинами даже в пределах одной поверхности. Наблюдаемые изменения абсолютных значений неоднородностей поверхностных потенциалов, их форма и относительное расположение полностью связаны со структурой пленок и поэтому, в зависимости от способа их получения, могут изменяться в определенных пределах.

5. Заключение

Полученные результаты показали, что поверхностные потенциалы электрохимически осажденных тонких пленок палладия и платины сильно неоднородны и отражают зернистую структуру рельефов их поверхностей. Значения пространственных размерностей Хаусдорфа–Безиковича поверхностных потенциалов этих пленок в локальном приближении значительно превышают топологическую размерность их проекций, что свидетельствует об их фрактальной геометрии. Было установлено, что фрактальная геометрия поверхностных потенциалов пленок платины и палладия определяется формой и характером распределения потенциальных неоднородностей, что оказывает существенное влияние на их средние значения. Кроме того, фрактальная геометрия потенциальных рельефов поверхностей этих пленок приводит к тому, что изменение полного электрического заряда их поверхностей происходит не пропорционально квадрату изменения линейных размеров исследуемых участков, как в двумерном случае, а значительно медленнее — пропорционально изменению их линейных размеров в степени $(4 - D_f)$, где $2 < D_f < 3$.

Таким образом, показано, что для точного проектирования приборов, линейные размеры металлических элементов которых меньше предела локального приближения, необходимо учитывать их фрактальную геометрию.

Список литературы

- [1] Н.А. Торхов, В.Г. Божков, И.В. Ивонин, В.А. Новиков. ФТП, **43**(1), 38 (2009).
- [2] В.Г. Божков, Н.А. Торхов, И.В. Ивонин, В.А. Новиков. ФТП, **42**(5), 546 (2008).
- [3] Н.А. Торхов. Деп. в ВИНТИ № 32-D2008 от 14.01.2008.
- [4] Н.М. Коровкина. Автореф. канд. дис. (СПб., Гос. электротехн. ун-т им. В.И. Ульянова (Ленина), 2006).
- [5] В.Е. Панин, П.В. Кузнецов, Е.Е. Дерюгин и др. ФММ, **84**(2), 118 (1997).
- [6] C.S. Pande, L.E. Richards, N. Louat, B.D. Dempsey, A.J. Schwoeble. Acta Metall. Mater., **35**(7), 1633 (1987).
- [7] R.H. Dauskardt, F. Haubensak, R.O. Ritchie. Acta Metall. Mater., **38**(2), 143 (1990).
- [8] D.W. Shi, J. Jiang, C.W. Lung. Phys. Rev. B, **54**(24), 17 355 (1996).
- [9] В.Л. Миронов. *Основы сканирующей зондовой микроскопии* (Н. Новгород. Ин-т физики микроструктур, 2004).
- [10] А.В. Анкудинов, В.П. Евтихеев, К.С. Ладугенко, А.Н. Титков, R. Laiho. ФТП, **40**(8), 1009 (2006).
- [11] В.В. Mandelbrot. In: *Statistical Models and Turbulence*, ed. by M. Rosenblatt, C. Van Atta. *Lecture Notes in Physics 12* (Springer, N.Y., 1972).
- [12] В.В. Mandelbrot. J. Fluid Mech., **62**, 331 (1974).
- [13] Е.Федер. *Фракталы* (М., Мир, 1991).
- [14] Б.Б. Мандельброт. *Фрактальная геометрия природы* (М., Ин-т компьютерных исследований, 2002).
- [15] А.Д. Морозов. *Введение в теорию фракталов* (М.–Ижевск, НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001).

- [16] П.А. Арутюнов, А.Л. Толстихина, В.Н. Демидов. Завод. лаб., **65**(9) 27 (1999).
- [17] А.В. Панин, А.Р. Шугуров. Поверхность, № 6, 64 (2003).
- [18] Н.А. Торохов. Деп. в ВИНТИ № 334-B2008 от 18.04.08.

Редактор Т.А. Полянская

Fractal geometry of the surface potential in the electrochemically deposited platinum and palladium films

*N.A. Torkhov, V.A. Novikov**

Research Institute for Semiconductor Devices,
634050 Tomsk, Russia

* Tomsk State University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract Distribution of the surface potential in the electrochemically deposited thin platinum and palladium films is strongly nonuniform, which is a reflection of the grain surface relief. The Hausdorf–Bezikovitch space dimensions of the surface potentials in these films are much higher than the topological dimensions of their projections, which is indicative of the fractal geometry of films. It is found that for the platinum and palladium film surfaces, differences both in the absolute values of the surface potential nonuniformity and in the shape and character of the surface potential distributions are observed. This significantly affects the way of formation (geometry) of the potential relief of films and their fractal dimensions. In addition, the fractal geometry of the surface potential relief in these films results in the fact that the total surface electric charge changes as the $(4 - D_f)$ power of the linear dimensions of examined surface areas, where $2 < D_f < 3$, in contrast to the two-dimensional case, where the total electric charge changes as a square of the linear dimensions of the examined areas. In conclusion, it is shown that for exact designing the devices with the submicron and nanodimensional metal elements on the basis of the thin platinum and palladium films, the fractal geometry of films should be taken into account.