

07

Электрические свойства металлических кластерных структур на поверхности диэлектриков

© А.А. Антипов, С.М. Аракелян, С.В. Кутровская, А.О. Кучерик

Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
E-mail: arak@vlsu.ru; kucherik@vlsu.ru

В окончательной редакции 5 марта 2014 г.

Приведены результаты экспериментов по формированию металлических микроконтактов фрактального типа. Показано, что сопротивление такого микроконтакта существенно зависит от его морфологических характеристик/фрактальной размерности, которые определяются параметрами лазерного воздействия. Предлагается новый подход по анализу свойств проводимости структур подобного рода.

Формирование металлических микроконтактов на поверхности диэлектриков — актуальная задача микро- и нанoeлектроники. В случае, когда контакт является конгломератом спекшихся наночастиц, данная система является неоднородной и представляет собой ансамбль омических контактов и областей, которые легко можно представить в виде эквивалентной резисторной схемы [1–3] для проведения соответствующих расчетов и контролируемого выбора режимов. Физика электропроцессов в таких наноструктурированных системах кластерного типа связана с электронной проводимостью в размерных тонкопленочных элементах. При этом электроны в зоне проводимости с энергией вблизи и выше уровня Ферми имеют, как известно, непрерывный спектр, связанный с движением вдоль контакта. Другая картина (размерные эффекты) наблюдается при движении электронов поперек контакта. При поперечных (в данном случае по высоте) размерах контакта порядка нескольких десятков нанометров возможна конкуренция баллистической и тепловой проводимости [2–4]. В случае, когда поперечные размеры контакта меньше длины свободного пробега электрона в материале ($\sim 5\text{--}50\text{ nm}$ для металла), может реализоваться баллистическая сверхпроводимость

даже при комнатных температурах [1–4], также возможно проявление квантовых эффектов, в частности, в транспорте электронов.

В последнем случае поперечные размеры контакта становятся настолько малыми, что необходимо учитывать квантование движения электрона, которое приводит к возникновению нескольких дискретных уровней [1–4]. Каждый дискретный уровень поперечного движения соответствует „одномерному каналу“, по которому переносится ток, определяемый квантом проводимости G . С увеличением поперечных размеров контакта (до 100 nm) электронам с энергией вблизи/меньше энергии Ферми становятся доступны новые уровни. Это означает, что открываются дополнительные квантовые каналы переноса тока (при открытии каждого такого канала кондактанс увеличивается на величину G) [4,5]. Принципиальное значение для данного направления исследований имеет конкретная топология, определяющая резисторные свойства микроконтакта. В свою очередь эта топология связана с процессом получения таких структур. Использование лазерных методов позволяет управляемым образом формировать протяженные массивы на поверхности диэлектриков [6], в том числе реализовывать различные кластерные структуры твердотельных покрытий в зависимости от конкретной схемы лазерного осаждения вещества на подложку, включая существенно неоднородное — фрактального типа [7]. Однако для расчета электросопротивления таких структур достаточно сложно применять известные соотношения, описывающие сопротивление регулярных резисторных структур, поскольку необходимо учитывать влияние рельефа на электрические свойства всего микроконтакта.

В данной работе исследовались микроконтакты с продольными размерами (длина), существенно превосходящими поперечные (ширина и высота). Для формирования таких микроконтактов использовался метод лазерного осаждения металлических наночастиц из коллоидных систем на твердую диэлектрическую подложку, который позволяет формировать протяженные массивы наночастиц кластерного типа с управляемой морфологией [7]. В качестве источника излучения использовался лазерный комплекс на основе иттербиевого волоконного лазера ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) с длительностью импульсов 100 ns, частотой следования импульсов 20 kHz и средней мощностью 1.5 W; диаметр лазерного пучка на поверхности подложки — $5 \mu\text{m}$. Коллоидный раствор наночастиц никеля (Ni) со средними размерами 10 nm и растворителя — глицерина наносился на поверхность стеклянной подложки тонким слоем

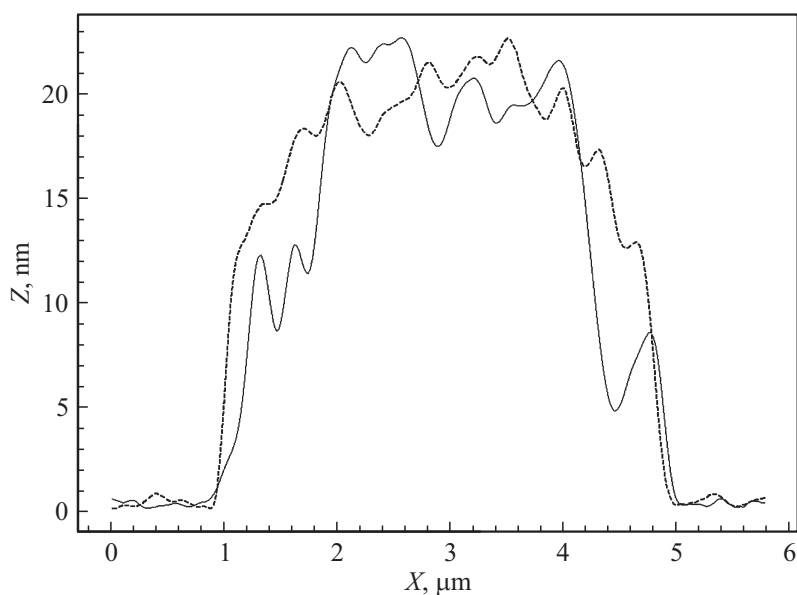


Рис. 1. Профили поперечного сечения рельефа, сформированного из наночастиц никеля микроконтакта на поверхности стекла. При осаждении использовались лазерные пучки с равномерным (пунктир) и гауссовым (сплошной) профилем.

(толщиной до 1 nm). Использование наночастиц никеля объясняется его широким применением в различных приложениях как металла платиновой группы. Формирование массива наночастиц на поверхности подложки осуществлялось сканированием лазерным пучком (дважды вдоль одного и того же направления) со скоростью 0.6 mm/s. Сформированный массив наночастиц имел протяженность 50 μm , средний поперечный размер 5 μm и среднюю высоту 20 nm с шероховатостью до 5 nm.

На рис. 1 представлены полученные с помощью атомно-силового микроскопа характерные профили осажденных массивов наночастиц Ni на поверхность подложки из кварцевого стекла КВ. Среднюю высоту частиц в слое (шероховатость) экспериментально изменяли профилем лазерного пучка (равномерный или гауссов, рис. 1), а также изменяя концентрацию частиц никеля в коллоидном растворе (рис. 2).

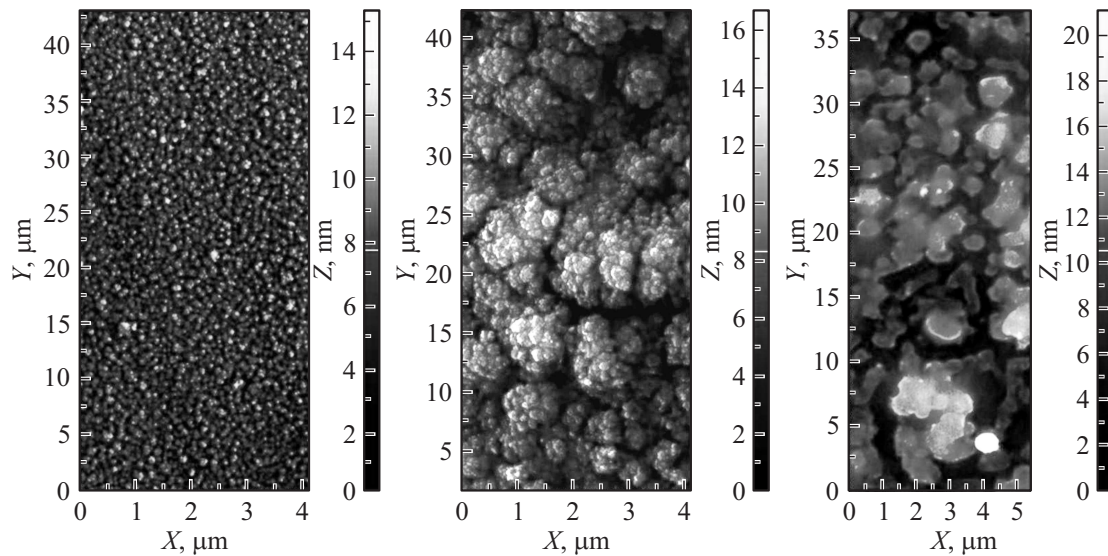


Рис. 2. АСМ-изображения протяженных массивов наноструктур, получаемых на поверхности стеклянной подложки в процессе лазерного осаждения со средней мощностью излучения $P = 1.5$ Вт, частотой следования импульсов 20 kHz, скоростью сканирования 0.6 mm/s: *a* — концентрация частиц в коллоиде 10^4 cm^{-3} , равномерное распределение интенсивности; *b* — концентрация частиц в коллоиде 10^6 cm^{-3} , равномерное распределение интенсивности; *c* — концентрация частиц в коллоиде 10^6 cm^{-3} , гауссово распределение интенсивности.

Полное электросопротивление R образовавшегося в неоднородной структуре микроконтакта (для электропроводности по его продольной длине, вдоль которой прикладывается поле \mathbf{E}) может быть рассчитано для случая, когда характерная длина резисторного участка определяется длиной свободного пробега электрона, согласно соотношению [2]

$$R = \frac{16\rho^\infty\lambda^\infty}{\pi d^2} \left(1 + \frac{L}{d} + \frac{d}{\lambda^\infty} \right), \quad (1)$$

где d — диаметр контакта, λ^∞ — длина свободного пробега электронов в массивном материале, ρ^∞ — удельное электросопротивление контактирующих частиц материала, L — длина микроконтакта.

Получаемые в нашем эксперименте наноструктуры находятся на границе применимости соотношения (1), поскольку микроконтакт состоит из наночастиц с диаметрами, приближающимися к длине свободного пробега электрона в материале (~ 10 nm). При этом ток в данной системе соприкасающихся сферических наночастиц будет протекать только через поверхности соприкосновения с площадью, стремящейся к нулю. Таким образом, речь идет об образовании множества продольных каналов для протекания тока, что существенно затрудняет поперечное распространение тока (нет целостного, однородного, поперечного сечения для участка цепи проводника). В этом случае при расчете полного электросопротивления микроконтакта необходимо модифицировать интегральную форму закона Ома для участка цепи, из которого выведена форма (1).

Для проводящих слоев, подобных представленным на рис. 2, использование интегрального отношения не вполне корректно, поскольку наблюдаемый рельеф возникающей структуры не является всюду дифференцируемой функцией и при получаемых характерных размерах протяженных массивов наночастиц размерные эффекты начинают оказывать существенное влияние на проводимость материала.

Для более точного расчета электросопротивления в данном случае требуется перейти от интегральной формы к сумме ряда

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \rho \frac{l_i}{S_i}, \quad (2)$$

где l_i — длина и S_i — площадь поперечного сечения i -го зерна.

Использование атомно-силового микроскопа (АСМ) позволяет производить измерения данных параметров: с точностью до 0.1 nm можно задать расстояние между последовательными точками измерения длины l_n и общую длину измеряемой кривой — L_0 .

Очевидно, что общая длина проводящего участка будет зависеть от точности проводимых измерений (количества точек в измеряемой области). Поэтому вместо суммирования по элементам участка цепи можно оценить общую длину характерного продольного профиля осажденного слоя, вдоль которого распространяется ток, используя методы фрактальной геометрии:

$$L = l_n \left(\frac{L_0}{l_n} \right)^D, \quad (3)$$

где $0 < D < 2$ — фрактальная размерность наблюдаемого осредненного рельефа вдоль продольного направления, рассчитанная по методу, предложенному нами в работе [8].

Аналогичным образом учитывается изменение площади поперечного сечения покрытия:

$$S = S_n \left(\frac{S_0}{S_n} \right)^{D_1}, \quad (4)$$

где S_n — площадь минимального элемента покрытия, S_0 — площадь измеренного усредненного рельефа поперечного среза, $1 \leq D_1 \leq 2$ — фрактальная размерность усредненного поперечного среза.

С учетом соотношений (2)–(4) можно перейти к модифицированному соотношению для расчета электросопротивления участка цепи с фрактальным рельефом:

$$R = A\rho \frac{l_n \left(\frac{L_0}{l_n} \right)^D}{S_n \left(\frac{S_0}{S_n} \right)^{D_1}}, \quad (5)$$

где $6 \leq A \leq 10$ — нормировочный коэффициент, определяемый по серии контрольных измерений. Таким образом, при измерении электросопротивления протяженных массивов наночастиц необходимо учитывать изменение значения сопротивления в зависимости от морфологии полученного в процессе лазерного осаждения поверхностного нанослоя, например, как в нашем случае, когда в системе реализуются микроконтакты и величина шероховатости поверхности осажденного слоя

Изображение микро-контакта	Длина L_0 , μm	Ширина d , μm	Средняя высота h , nm	D	D_1	R_{cal} , Ω	R_{exp} , Ω
Рис. 2, <i>a</i>	50	5	8	1.06	1.79	0.45	1.72
Рис. 2, <i>b</i>	50	5	10	1.21	1.64	4.56	5.24
Рис. 2, <i>c</i>	50	5	14	1.32	1.58	29.13	30.86

начинает оказывать существенное влияние на сопротивление участка материала в целом.

Электросопротивления микроконтактов исследовались с помощью измерителя электросопротивления RMS-EL-Z. Точность данного измерения электросопротивления определяется усреднением по близким (случайным — при многократных измерениях) точкам контакта датчика/иглы измерителя электросопротивления и исследуемой поверхности (при фиксированном — в среднем — расстоянии между измеряемыми точками участка цепи). Кроме того, происходит дополнительное усреднение в локализованной точке по поперечному сечению конца измерительной иглы измерителя электросопротивления. Оба эти фактора определяют фактическую точность измерения. Результаты измерений и расчетов электросопротивлений контактов представлены в таблице.

Отличие в значениях величин электросопротивления, рассчитанных в соответствии с (5) и непосредственно измеренных, определяется (кроме влияния аппаратной функции измерителя и качеством электроконтакта) выбранной процедурой усреднения профиля осажденного слоя. Кроме того, физическая причина таких различий может быть связана с проявлением эффекта квантования контактанса. Тем не менее предложенный метод расчета электросопротивления протяженных микроконтактов качественно и с достаточной степенью точности позволяет определять поведение проводящих свойств получаемых структур. Следовательно, используя предлагаемый метод получения наноструктур, можно ожидать, что при формировании на поверхности диэлектрической подложки отдельных металлических кластеров будет происходить существенное падение величины сопротивления.

Таким образом, в данной работе представлены результаты по лазерному формированию металлических микроконтактов. Показано, что

метод лазерного осаждения металлических наночастиц из коллоидных систем на поверхность диэлектрической подложки позволяет формировать микроконтакты с различной морфологией. На основе методов фрактальной геометрии предложен подход к расчету электросопротивления формируемых контактов, позволяющий учитывать их морфологические свойства. Проведено сравнение рассчитанных и измеренных значений электросопротивления, показано качественное совпадение результатов.

Научная публикация подготовлена в рамках государственного задания ВлГУ № 2014/13 по выполнению государственных работ в сфере научной деятельности, гранта РФФИ № 14-02-31314 мол_а, Научной школы № НШ-89.2014.2 и гранта президента РФ № МК-4321.2014.2.

Список литературы

- [1] *Адамов Д.Ю., Адамов Ю.Ф., Горшкова Н.М.* // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 10. С. 9–14.
- [2] *Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А.* Основы наноэлектроники. М.: Логос, 2006. 496 с.
- [3] *Mahfouzi F., Nagaosa N., Nikolic B.K.* // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. P. 166 602.
- [4] *Mahfouzi F., Nikolic B.K., Chen S.-H., Chang C.-R.* // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. P. 195 440.
- [5] *Bayandin K.V., Lesovik G.B., Martin T.* // Phys. Rev. B: Condensed Matter and Materials Physics. 2006. V. 74. N 8.
- [6] *Manshina A.A., Povolotskiy A.V., Povolotskaya A.V., Ivanova T.Yu., Koshevoy I.O., Tunik S.P., Suvanto M., Pakkanen T.A.* // Surface & Coatings Technology. 2012. V. 206. P. 3454–3458.
- [7] *Антипов А.А., Аракелян С.М., Кутровская С.В.* и др. // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 3. С. 4–8.
- [8] *Аракелян С.М., Быков В.А., Кутровская С.В.* и др. // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 4. С. 8–13.