

Выбор оптимальных режимов измерений в сканирующей электропроводящей микроскопии

С.В. Лемешко¹, И.В. Сагунова², Ю.А. Чаплыгин², В.И. Шевяков²

¹ЗАО «НТ-МДТ» (г. Москва)

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Selection of Measurements Optimal Conditions in Scanning Electrical-Conductivity Microscopy

S.V. Lemeshko¹, I.V. Sagunova², Yu.A. Chaplygin², V.I. Shevyakov²

¹CJSC «NT-MDT», Moscow

²National Research University of Electronic Technology, Moscow

Приведены результаты исследования транспортных свойств в сканирующей электропроводящей микроскопии. Выявлена корреляция необходимого усилия прижатия проводящего кантилевера к исследуемой поверхности, обеспечивающего тесный контакт, с твердостью материала и толщиной проводящего покрытия кантилевера. Показано, что в ходе исследований при повышенных значениях разности потенциалов, с одной стороны, необходимо учитывать возможный эффект перераспределения материала проводящего покрытия с поверхности кантилевера на исследуемый образец, с другой – возможность обеспечения более высокого разрешения при исследовании топографии образца проводящим кантилевером.

Ключевые слова: сканирующая электропроводящая микроскопия; кантилевер; проводимость; полупроводники; наноразмерные элементы.

The results of the studies on the scanning electrical-conductivity Transport Properties have been shown. The correlation of the required pressing force on the conductive cantilever to the surface, which provides a close contact with the test sample, with the material hardness and the thickness of the cantilever conductive coating, has been revealed. It has been shown that while investigating at higher values the potential difference on one hand, it is necessary to take into account the possible effect of the conductive coating material redistribution from the cantilever to the sample surface, on the other hand- the ability to provide the higher resolution while investigating the sample topography by conductive cantilever.

Keywords: Scanning Electrical-Conductivity Microscopy, Conductive Cantilever, Conductivity, semiconductors, nano-sized elements.

Введение. Сканирующая зондовая микроскопия – один из современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности объектов. Практический

интерес для исследования проводящих нанообъектов, в том числе проводящих элементов нанoeлектроники, представляет сканирующая электропроводящая микроскопия (СЭПМ), использующая режим атомно-силовой микроскопии (АСМ) в контактной моде и проводящий кантилевер. СЭПМ обеспечивает одновременное измерение топографии поверхности проводящих объектов и исследование растекания электрического тока на том же участке поверхности. В результате получают изображения топографии и картины растекания тока [1–3].

Преимуществом СЭПМ является принципиальная возможность фиксировать объекты, которые меньше диаметра острия иглы кантилевера. Это связано с тем, что картина растекания тока в отличие от топографической дает более полную информацию о проводимости нанообъектов. При сканировании поверхностей с неровностями рельефа или нанообъектами, меньшими радиуса кривизны игл кантилеверов, АСМ-изображения искажаются (имеет место эффект конволюции изображения). Фактически получаемое АСМ-изображение является «сверткой» изображений поверхности острия иглы кантилевера и исследуемого нанообъекта [4]. В СЭПМ данный паразитный эффект отсутствует [5].

Однако, несмотря на очевидные преимущества, метод СЭПМ не получил до настоящего времени должного развития. В [5] приведены результаты исследования техники измерений в СЭПМ, иллюстрирующие эффективность метода.

В настоящей работе представлены результаты исследования транспортных свойств в СЭПМ.

Выбор оптимального значения усилия прижатия кантилевера. Многие полупроводниковые материалы и металлические пленки содержат на своей поверхности естественный оксид с адсорбированным влагосодержащим слоем [6]. Поэтому для наиболее эффективного измерения в СЭПМ таких материалов надо определить минимально необходимое усилие прижатия проводящих кантилеверов для обеспечения тесного контакта иглы с исследуемой поверхностью. Это может быть реализовано при исследовании зависимости вольт-амперной характеристики (ВАХ) от усилия прижатия кантилевера.

Для анализа выбрана поверхность высоколегированной кремниевой подложки. Исследование проводили с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver P47 (ЗАО «НТ-МДТ», г. Москва) и проводящих кантилеверов с покрытиями на основе карбида дивольфрама W_2C , оксида титана TiO_{2-x} [1], платины Pt и золота Au. Толщина покрытия на основе W_2C и TiO_{2-x} составляла 5 нм, Pt – 15 нм, Au – 15 и 30 нм. Следует отметить, что жесткость материала выбранных покрытий убывает в ряду: W_2C , TiO_{2-x} , Pt, Au. После подвода иглы кантилевера к образцу определяли силу прижатия при помощи спектроскопии силы от расстояния. Одновременно измеряли ВАХ системы проводящий кантилевер – кремниевая подложка для различных значений силы прижатия. Силу прижатия рассчитывали исходя из жесткости балки кантилевера. В свою очередь, жесткость балки измеряли на основе собственных температурных колебаний кантилевера, принимая во внимание оптическую систему дефлектометра.

На рис.1 приведены ВАХ системы с проводящим покрытием на основе W_2C для различных сил прижатия иглы кантилевера к исследуемой поверхности.

При малых силах прижатия иглы наблюдается нелинейная ВАХ (рис.1,а–в) структуры металл – диэлектрик – высоколегированный полупроводник. В рассматриваемом случае в качестве диэлектрика выступает двухслойная структура: слой адсорбата – слой естественного оксида кремния, электрический пробой которой наблюдается при значении $\sim 1В$. Обеспечение тесного омического контакта происходит при силе прижатия 250 нН и более, когда наблюдается линейная форма ВАХ (рис.1,г).

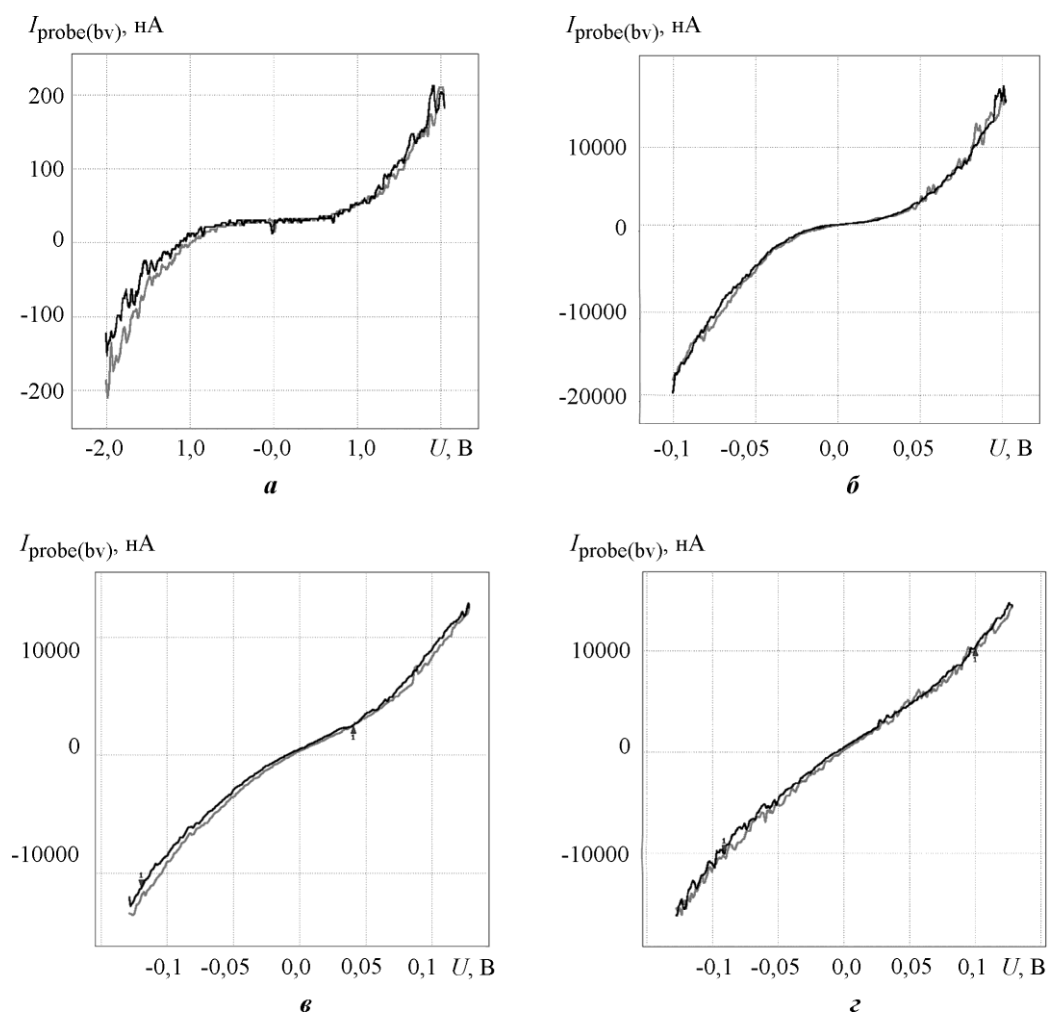


Рис.1. ВАХ системы проводящий кантилевер – кремниевая подложка при различных силах прижатия иглы кантилевера: а – 80 нН; б – 150 нН; в – 200 нН; г – 250 нН

Исследования показали, что для кантилевера с покрытием на основе TiO_{2-x} тесный омический контакт образовывался при силе прижатия 280 нН, на основе Pt – при 350 нН, на основе Au толщиной 15 и 30 нм и 390 и 430 нН соответственно.

Разницу в минимально необходимой силе прижатия для обеспечения тесного омического контакта для этих кантилеверов можно объяснить различной толщиной их проводящего покрытия (соответственно, различной величиной радиуса кривизны острия кантилевера) и твердостью материала покрытия. Для формирования тесного омического контакта при использовании более острых игл, обеспечивающих при одном и том же усилии прижатия более высокое значение давления на образец, сила прижатия должна быть меньше.

Таким образом, для обеспечения эффективности проведения измерений в каждом конкретном случае в зависимости от исследуемого материала и конструктивных свойств проводящего покрытия кантилевера следует определить минимальную необходимую величину усилия прижатия иглы кантилевера к исследуемому образцу.

Для иллюстрации предложенной методики изготовлена структура, этапы формирования которой приведены на рис.2.

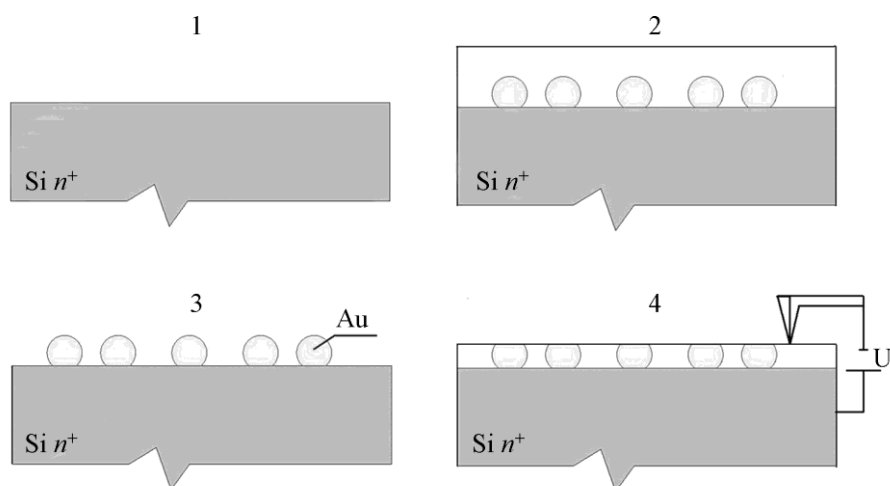


Рис.2. Этапы (1–4) формирования кремниевой подложки, содержащей диэлектрический слой с размещенными в его объеме наночастицами золота

Частицы коллоидного золота диаметром ~ 10 нм наносили на высоколегированный кремний, после чего осаждали пленку оксида кремния толщиной, превышающей диаметр наночастиц золота, и осуществляли тотальную полировку пленки окисла до вскрытия островков золота. Подводили электрический контакт к высоколегированной подложке и с помощью СЭПМ исследовали данную структуру.

Измерения проводили с использованием кантилевера, покрытого пленкой W_2C толщиной 5 нм. Между кремниевой подложкой и иглой кантилевера подавали напряжение ~ 2 В. Сначала сканировали поверхность структуры, находили проводящий участок (содержал наночастицу золота). Затем определяли минимально необходимое значение усилия прижатия для обеспечения линейной ВАХ, составившее 220 нН. Более низкое значение усилия прижатия в данном случае в сравнении с контактом к высоколегированной кремниевой подложке обусловлено отсутствием естественной пленки оксида на поверхности золота.

На рис.3 представлены АСМ-изображения поверхности диэлектрической пленки с наночастицами золота и картины растекания тока на том же участке поверхности.

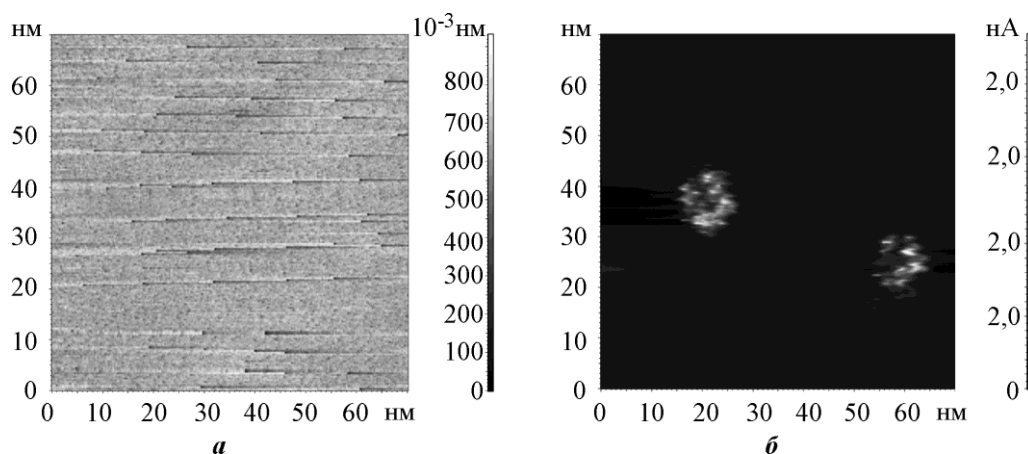


Рис.3. АСМ-изображение поверхности диэлектрической пленки со встроенными в нее наночастицами золота (а) и картина растекания тока (б)

Из представленных данных видно, что картина растекания тока отличается от АСМ-изображения поверхности диэлектрической пленки. На топографическом изображении видны лишь следы полировки и результаты действия паразитного эффекта залипания зонда (статическое трение). На «токовом» изображении прослеживаются всплески электрического тока в локальных местах структуры, в которых содержатся наночастицы золота. Из «токового» изображения определили размеры наночастиц, они составили 10 нм, что согласуется с исходными размерами осажденных наночастиц золота.

Следует отметить, что метод характеризуется повышенной разрешающей способностью, которая в основном определяется радиусом кривизны острия иглы проводящего кантилевера. В других аналогичных методах, в частности методе Кельвина, разрешающая способность определяется расстоянием от острия иглы кантилевера до исследуемой поверхности.

Особенности измерений в СЭПМ при повышенном напряжении. При измерениях в СЭПМ прикладываемая разность потенциалов к структуре варьируется от нуля до некоторого максимального значения (в микроскопе Solver P47 она составляет 10 В). Научный и практический интерес представляет исследование процесса измерения при повышенном напряжении. Измерение проводили с использованием кантилеверов с проводящим покрытием на основе Au толщиной 15 нм. В качестве образца использовался высокоориентированный графит, который отличается хорошей плоскостностью и проводимостью. Образец заземляли. Напряжение к игле кантилевера прикладывали таким образом, чтобы электроны двигались от него в подложку. Напряжение на зонде варьировали в диапазоне 5–10 В. Первоначально определяли необходимую величину усилия прижатия кантилевера, составившую 370 нН. Проводили сканирование заданного участка поверхности образца, затем осуществляли процедуру отрыва кантилевера от поверхности и повторно проводили сканирование того же участка поверхности образца.

В ходе многократных исследований выявлено, что изображение поверхности образца при подаче определенного (10 В) напряжения на иглу, полученное до процедуры отвода иглы от поверхности, отличается от изображения, получаемого после. Так, на рис.4,а приведено АСМ-изображение поверхности графита до отвода кантилевера, а на рис.4,б – изображение того же участка после трех отрывов иглы от образца.

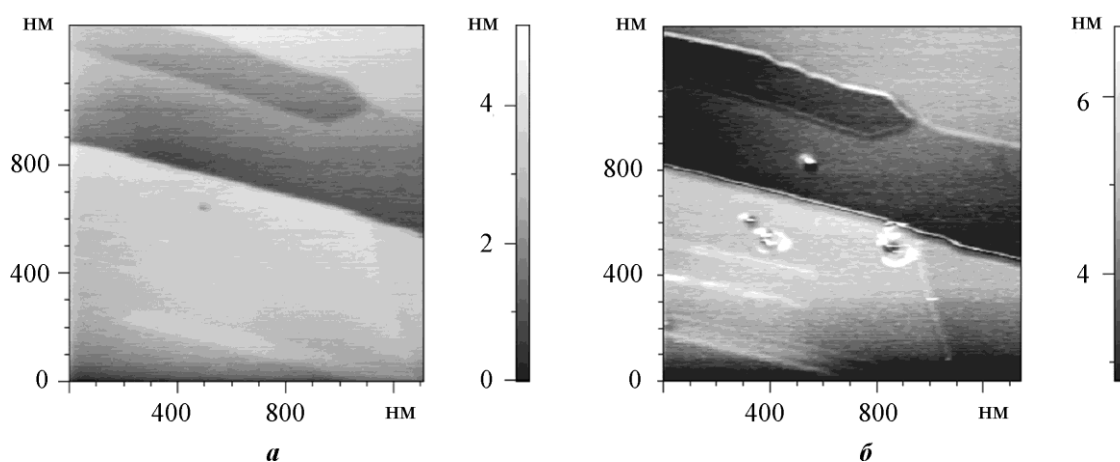


Рис.4. АСМ-изображения поверхности графита до отвода иглы кантилевера от поверхности образца (а) и после (б)

На АСМ-изображении поверхности, полученном после отрыва иглы, видны три бугорка (см. рис.4,б), которые, вероятно, образовались вследствие стекания материала покрытия кантилевера на поверхность графита из-за проявления известного эффекта электромиграции при указанной разности потенциалов [7]. Электромиграция материала покрытия одновременно приводит и к утонению острия иглы. Об этом свидетельствует тот факт, что АСМ-изображение (см. рис.4,б) имеет лучшее разрешение. В частности, на АСМ-изображении поверхности образца заметны более мелкие детали, которые не прослеживаются на первоначальном АСМ-изображении. Кроме того, на поверхности графита появились наночастицы золота, осевшие при электромиграции (рис.5).

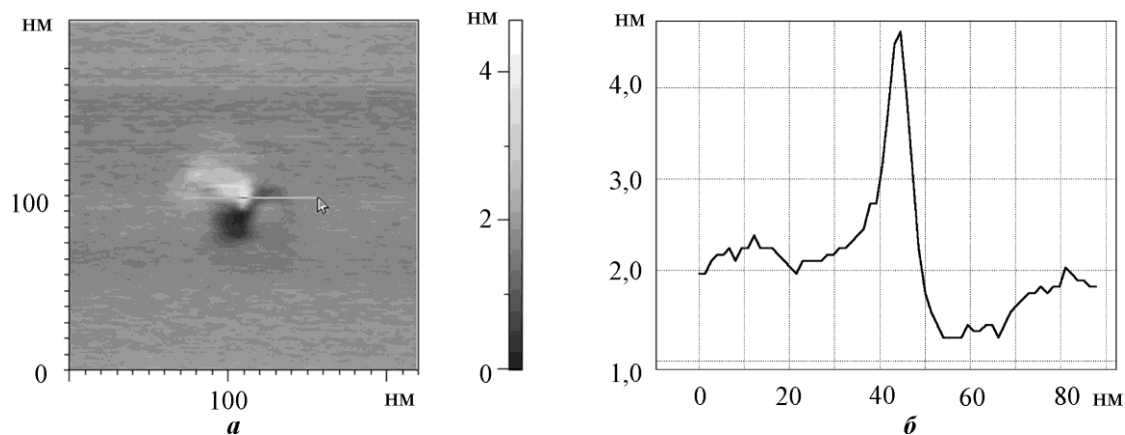


Рис.5. Увеличенное АСМ-изображение бугорка, образовавшегося на поверхности графита при отводе иглы кантилевера от образца (а), и профиль его сечения (б)

Заключение. В результате проведенных исследований выяснено, что при измерениях в СЭПМ следует определить минимально необходимое усилие прижатия иглы кантилевера к исследуемой поверхности для обеспечения тесного контакта, характеризуемого линейной ВАХ. Имеет место корреляция необходимого усилия прижатия проводящего кантилевера с твердостью материала и толщиной проводящего покрытия кантилевера. При повышенных значениях разности потенциалов следует учитывать возможный эффект перераспределения материала проводящего покрытия с поверхности кантилевера на образец, а также возможность обеспечения более высокого разрешения при исследовании топографии образца проводящим кантилевером.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.581.21.0007 от 03.10.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI58114X0007).

Литература

1. *Shevyakov V., Lemeshko S., Roschin V.* Conductive SPM probes of base Ti or W refractory compounds // Nanotechnology. – 1998. – № 9. – P. 352–355.
2. Analysis of the two-dimensional-dopant profile in a 90 nm complementary metal–oxide–semiconductor technology using scanning spreading resistance microscopy / *P. Eyben, D. Alvarez, M. Jurczak et al.* // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2004. – Vol. 22. – Iss. 1. – P. 364–368.
3. *Douhéret O., Bonsels S., Anand S.* Determination of spatial resolution in atomic-force-microscopy-based electrical characterization techniques using quantum well structures // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2005. – Vol. 23. – Iss. 1. – P. 61–65.
4. *Villarubia J.S.* Algorithms for scanned probe microscope image simulation, surface reconstruction, and tip estimation. // J. Res. Natl.Inst. Stand. Technol. – 1997. – Vol. 102. – P. 425–448.

5. Peculiarities of measurements in scanning electrical-conductivity microscopy / **A. Belov, S. Gavrilo, M. Nasarkin et al.** // Russian Microelectronics. – 2012. – Vol. 41(7). – P. 431–436.

6. **Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Путря М.Г., Шевяков В.И.** Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных схем. Ч.2. – М.: Бинум. Лаборатория знаний, 2009. – 422 с.

7. **English A.T., Kinsbron E.** Electromigration –induced failure by edge displacement in fine –line aluminium 0.5- copper thin film conductors // J. Appl. Phys. – 1983. – Vol. 54. – С. 268–274.

Статья поступила
17 июля 2014 г.

Лемешко Сергей Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник ЗАО «НТ-МДТ» (г. Москва). *Область научных интересов:* наноэлектроника, сканирующая зондовая микроскопия.

Сагунова Ирина Владимировна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ. *Область научных интересов:* сканирующая зондовая микроскопия.

Чаплыгин Юрий Александрович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ИЭМС, ректор МИЭТ. *Область научных интересов:* микро- и наноэлектроника, микро- и наносистемная техника, нанотехнология.

Шевяков Василий Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* микро- и наноэлектроника, сканирующая зондовая микроскопия.

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал

RUSSIAN MICROELECTRONICS

English translation of selected articles from

Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika. –

Vol. 43, No. 7, 2014. - ISSN: 1063-7397



<http://www.maik.ru>

<http://www.springerlink.com>