

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО МАЛЫХ ЗАЗОРОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПРОВОДАХ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

С.А. Дагесян, Е.С. Солдатов, А.С. Степанов
Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова
dagesyan@physics.msu.ru

В работе реализован метод создания предельно малых (1-5 нм) зазоров между металлическими электродами для одноэлектронного транзистора и исследованы электрические характеристики полученных систем. Для создания зазоров использован эффект электромиграции атомов металла в тонких плёнках [1, 2], возникающий при пропускании по ним тока с высокой плотностью.

Подобные системы могут быть использованы для создания электронных устройств нового типа, использующих другие физические принципы [3], нежели полупроводниковая электроника. Они могут применяться в электронике для исследования электронного транспорта через отдельные молекулы [4] и создание на этой основе молекулярных элементов [5], а также для построения молекулярных электронно-оптических элементов [6] и др.

На кремниевой подложке, изолированной 400 нм слоем оксида кремния, создана система электродов, закороченных тонкими (14 нм) и узкими (35–45 нм) золотыми нанопроводами (15 шт.). При этом, предварительно под золотые нанопровода напылена алюминиевая плёнка, которая может выполнять роль затвора транзистора. Алюминиевая плёнка отделена от электродов слоем оксида алюминия (8 нм), не допускающим значимых туннельных токов между ними.

Золотые нанопровода разрывались с помощью эффекта электромиграции. Электромиграция представляет из себя направленное движение атомов внутри кристаллической решетки при пропускании через неё тока большой плотности. Движение атомов происходит в направлении тока электронов, так как вызывается передачей им импульса от электронов проводимости. При этом существует вероятность локализации дефектов решётки в одном месте, что в конечном счете приводит к разрыву.

Для получения предельно малых зазоров с максимальным выходом годных образцов необходимо было разработать систему непрерывного контроля за состоянием нанопровода с максимально быстрой реакцией на изменения в системе. Поэтому электромиграция проводилась в автоматическом режиме (без участия оператора) со следящей за сопротивлением нанопровода обратной связью. Обратная связь останавливает ток через нанопровод в случае превышения сопротивлением заданного порогового значения с задержкой всего 20-40 мкс (характерное время

перестройки плёнки - десятки миллисекунд). Это позволяет избежать плавления золота и предотвратить неконтролируемый лавинообразный разрыв плёнки. Был разработан алгоритм, который позволяет оборудованию в автоматическом режиме подстраивать пороговые значения под уровень шумов для обеспечения максимально возможной чувствительности обратной связи. В сумме все эти усилия позволили разрывать каждый нанопровод в среднем за 25 минут работы алгоритма с выходом годных зазоров (1-5 нм) около 80%. Полученные зазоры были отсняты в сканирующий электронный микроскоп (рис. 1).

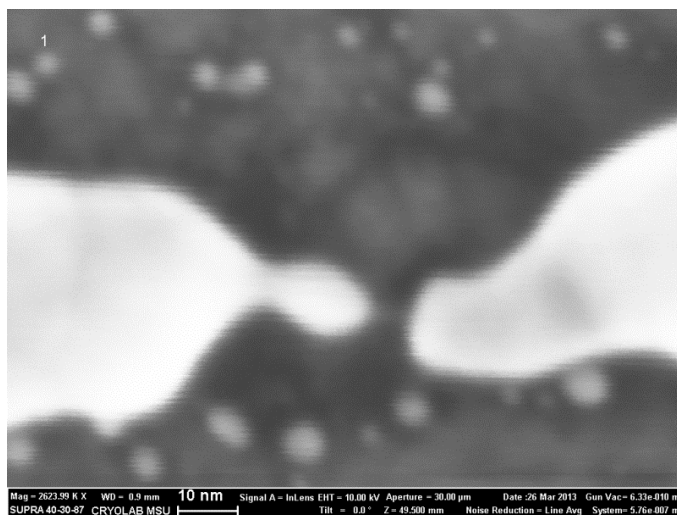


Рис. 1. Снимок нанозазора шириной 5 нм, сделанный с помощью сканирующего электронного микроскопа

Сопrotивление нанопроводов, при котором работа алгоритма завершилась, составляло 1700 Ом (около 15 фундаментальных каналов проводимости [7,8]). Далее под воздействием внутренних напряжений, возникающих в ходе процесса электромиграции, происходит самопроизвольный разрыв плёнки. Для контроля этого процесса была разработана система, позволяющая проследить динамику этого процесса.

На рис. 2 показана зависимость проводимости одного из нанопроводов от времени. Во время саморазрыва проводимость образца менялась дискретно, причем изменения проводимости были кратны фундаментальному кванту проводимости:

$$G_0 = \frac{e^2}{h}$$

Такое поведение говорит о том, что процесс носит фундаментальный характер и показывает чистоту процесса - отсутствие паразитных проводящих каналов. Что, собственно, требуется от электродов молекулярного элемента.

Время, которое занимал саморазрыв, варьировалось от 5 минут до нескольких часов. Что, по-видимому, объясняется разным качеством плёнок нанопроводов.

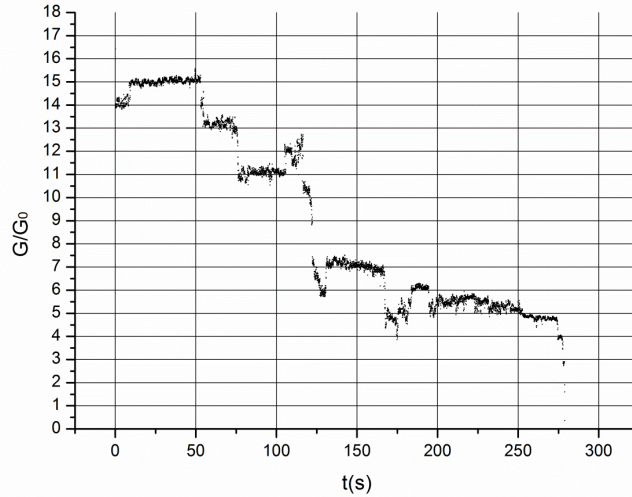


Рис. 2. Зависимость проводимости от времени для одного из нанопроводов

Для полной характеристики нанозазоров были измерены вольтамперные характеристики зазоров в широком интервале напряжений (от -10 В до 10 В). Дифференциальное сопротивление зазоров в области малых напряжений варьируются от 100 МОм до 400 ГОм, что объясняется экспоненциальной зависимостью туннельного тока от ширины зазора и от работы выхода электронов из металла.

На основе анализа вольтамперных характеристик в координатах Фаулера-Нордгейма [9] (зависимость $\ln(\frac{I}{V^2})$ от $\frac{1}{V}$) были получены данные о работе выхода электронов из разорванных электродов (рис. 3).

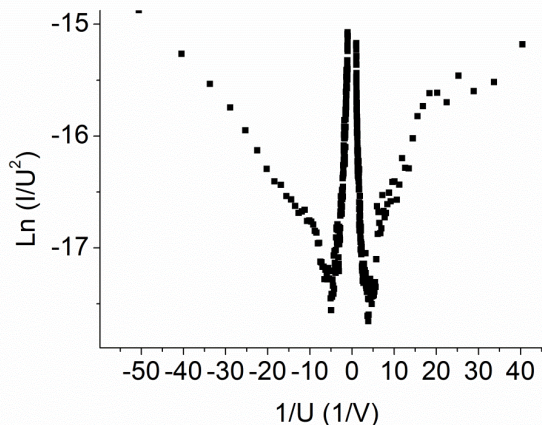


Рис. 3. Вольтамперная характеристика одного из зазоров в координатах Фаулера-Нордгейма. Положение минимумов аргумента позволяет оценить работу выхода из электродов

Полученные значения варьируются в пределах от 0,1 эВ до 1 эВ, что значительно меньше работы выхода из макроскопического образца золота (4,76 эВ). Такое различие, по-видимому, объясняется совокупностью не-

скольких факторов: малая толщина плёнки, большое количество дефектов в металле в области зазора после электромиграции, форм-фактор [10].

Таким образом, в данной работе разработана методика формирования предельно малых (1-5 нм) зазоров в металлических (золото) нанопроводах, необходимых для создания элементов нанoeлектроники нового поколения, основанных на новых принципах функционирования (системы молекулярной электроники, одноэлектронные устройства). Исследована динамика заключительного этапа формирования таких зазоров (саморазрыв), проходящего через фундаментальные состояния системы с квантованной (кратной G_0) проводимостью. Исследованы электрические характеристики получаемых зазоров. Показан туннельный характер электронного транспорта. Проведённый анализ позволил выявить на вольтамперных характеристиках области с разным режимом туннелирования (режим прямого туннелирования и автоэлектронной эмиссии), а также область перехода от одного к другому с помощью наблюдения минимума вольтамперной характеристики, положение которого даёт оценку работы выхода. Работа выхода для полученных электродов лежит в широком интервале значений (0.1-1 эВ), что объясняется совокупностью нескольких факторов, таких как толщина плёнки, форма электродов, большое количество дефектов в области зазора.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что полученные зазоры являются хорошей основой для создания в будущем молекулярных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hongkun Park // *Appl. Phys. Lett.* 75, 301 (1999).
2. Hubert B. Heersche // *Appl. Phys. Lett.* 91, 072107 (2007);
3. Averin D. V. and Likharev K. K. // Elsevier, 1991, pp. 173–271
4. Porath Danny, Bezryadin Alexey // *Nature* 403, 635-638 (2000)
5. Aviram A., Ratner M. A. // 29, 277 (1974).
6. Marquardt Christoph W. // *Nature Nanotechnology* 5, 863–867 (2010)
7. Landauer R. // *IBM Journal of Research and Development*, 1, 233 (1957)
8. Agrait Nicolas, Yeyati Alfredo Levy, *Physics Reports* 377, 81–279 (2003)
9. Fowler R. H. and Nordheim L. // *Proceedings of the Royal Society A*, 119, 173 – 181 (1928)
10. Mangin A., Anthore A. et al. // *Phys. Rev. B* 80, 235432, (2009)