

## **Создание зазоров нанометрового масштаба между тонкопленочными электродами методом электромиграции**

**Степанов Антон Сергеевич, Кутуров Андрей Николаевич**

*студент*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*E-mail: [toshas@inbox.ru](mailto:toshas@inbox.ru)*

### **Введение.**

Современная технология изготовления полупроводниковых элементов подходит к своему технологическому и физическому пределу. Дальнейшее стремление к миниатюризации устройств, неизбежно требует использования в их основе новых физических явлений. Одним из претендентов на использование в новых элементах является эффект одноэлектронного туннелирования [1]. Размеры структур, в которых он может наблюдаться при комнатной температуре, лежат в диапазоне 10 нм и менее. Основным устройством, в котором заложен эффект одноэлектронного туннелирования, является одноэлектронный мономолекулярный транзистор. По сути, он представляет собой одиночную молекулу, отделенную туннельными переходами от подводящих электродов. Первым этапом конструирования такого транзистора является создание электродов с размерами между ними порядка нескольких нанометров, на которые в последствии будет закрепляться молекула. Традиционные методы литографии не могут обеспечить требуемые величины зазоров. Существует несколько способов получить необходимую величину зазора между электродами: метод электрохимического зарастивания двух электродов [2], метод, заключающийся в допылении металла на электроды [3]. Данная работа посвящена созданию электродов с характерным расстоянием между ними порядка единиц нанометров методом, основанным на эффекте электромиграции атомов металла в тонкопленочных структурах под воздействием протекающего через них тока [4].

### **Методика изготовления и измерения образцов.**

Заготовка для создания зазора представляла собой кремниевый чип размером 10x10мм с нанесенным на него слоем оксида кремния. В центре чипа последовательным применением методов магнетронного нанесения, термического напыления, электронно-лучевой литографии на электронном микроскопе, реактивно-химического травления формировалась структура соприкасающихся электродов. Электроды замыкались между собой тонкопленочным мостиком, который создавался методом двухтеневого напыления с использованием технологии подвешенной маски. Помимо замкнутых электродов на чипе формировалась система подводящих проводов, позволяющая подключать полученный чип к измерительной установке. Установка, включающая в себя пикоамперметр Keithley-6487, плату АЦП Advantech PCI-1713, плату ЦАП Advantech PCI-1720, позволяет пропускать через образец ток в диапазоне от 0 до 20 мА и задавать напряжение в диапазоне от 0 до 12 В с шагом 1 мВ. Управление производится программой на платформе Windows.

Для получения нанозазора на схему подавалось постепенно увеличивающееся напряжение, одновременно с этим, автоматически на сопротивлении известного номинала измерялось падение напряжения и программно вычислялась величина сопротивления мостика в центре чипа. Измерения проводились с периодом менее 500 мкс, далее проводилось усреднение и сопоставление полученного значения с исходным сопротивлением мостика. Таким образом производилось контролирование процесса. На части образцов при достижении некоторого тока через переключку (для разных образцов от 5 до 15 мА) начинался процесс электромиграции, сопротивление мостика начинало резко увеличиваться и при достижении заранее заданного значения, приложенное к схеме напряжение снималось. После этого на пикоамперметре измерялась вольтамперная характеристика образцов.

### **Результаты.**

Были исследованы около ста замкнутых электродов. Полученные вольтамперные характеристики (ВАХ) можно разделить на три семейства: линейная зависимость напряжения от тока, нелинейная зависимость и график, демонстрирующий отсутствие

тока при любых напряжениях. Первое семейство соответствует замкнутым электродам, третье слишком сильно увеличившемуся зазору (более 20 нм). Наибольший интерес представляют образцы с нелинейной вольтамперной зависимостью, которая, по всей видимости, вызвана туннельной проводимостью через предельно малый зазор. Визуально оценить такой зазор между электродами не представляется возможным, так как он лежит за пределами разрешения электронного микроскопа «Stereoscan-240» (примерно 10 нм), в то же время, нелинейная зависимость тока от напряжения свидетельствует о том, что зазор все же есть. Сравнение графиков ВАХ с ВАХ классического туннельного перехода, рассчитанной по модели Симмонса, дает значение величин зазоров в диапазоне 2-5 нм.

#### **Выводы.**

Таким образом, полученные результаты показывают возможность создания зазора в несколько нанометров между электродами методом, основанным на эффекте электромиграции. Такие электроды пригодны для построения одноэлектронного мономолекулярного транзистора. В то же время, выход годных образцов (одна десятая от общего числа) говорит о необходимости частичной оптимизации технологии изготовления образцов для получения большего процента годных электродов.

#### **Литература**

1. Likharev K.K. Proc. Ieee. Vol.87.No.4. April 1999
2. Y.V. Kervennic, H.S.J. van der Zant, A.F. Morpurgo, L. Gurevich and L.P. Kouwenhoven, Appl. Phys. Lett., 80, 321 (2002).
3. P. Steinmann and J.M.R. Weaver, J. Fabrication of sub-5 nm gaps between metallic electrodes using conventional lithographic techniques. Vac. Sci. and Technol. B, 22, 3178 (2004).
4. Paul S Ho and Thomas Kwok, Electromigration in metals, Rep. Prog. Phys. 52, 301-348 (1989)