

## РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

## Использование сфокусированного ионного пучка при создании молекулярного одноэлектронного транзистора

И. В. Сапков<sup>1</sup>, В. В. Колесов<sup>2a</sup>, Е. С. Солдатов<sup>1b</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники; лаборатория криоэлектроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. <sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники РАН. Россия, 101999, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7. E-mail: <sup>a</sup>kvv@cplire.ru, <sup>b</sup>esold@phys.msu.ru

Статья поступила 23.12.2008, подписана в печать 24.04.2009.

Созданы чипы-заготовки для молекулярного одноэлектронного транзистора с использованием технологии травления сфокусированным ионным пучком, характеризующейся высокой скоростью проведения процесса, воспроизводимостью результатов, снижением требований к предшествующим литографическим операциям и вполне реальными перспективами уменьшения ширины зазора. Определены оптимальные параметры по разрезанию металлической перемычки электродов, позволяющие получать зазор в 70 нм, приемлемый для дальнейших операций по формированию системы «нависающих» электродов.

**Ключевые слова:** нанотехнология, молекулярный транзистор, сфокусированный ионный пучок.

УДК: 538.971. PACS: 85.65.+h.

### Введение

Одним из возможных путей развития современной микроэлектроники, стремящейся к миниатюризации элементной базы, является молекулярная электроника, обладающая потенциалом выхода на базисные элементы размером в одну молекулу. Одним из элементов молекулярной электроники можно назвать молекулярный одноэлектронный транзистор — молекулу, расположенную между двумя электродами, потенциал на которой изменяется с помощью третьего электрода (рис. 1). Работа такого устройства основана на явлении одноэлектронного туннелирования, экспериментально обнаруженном еще в 1969 г. [1], количественная теория которого, так называемая «ортодоксальная» теория, была построена в 1985 г. [2].

Задача создания молекулярного одноэлектронного транзистора может быть разделена на две подзадачи. Первая — создание подводящих наноэлектродов с таким зазором между ними, который бы позволил исследовать объекты нанометровых размеров [3–8]. Вторая — помещение и закрепление одиночной молекулы (или функциональной наночастицы) между такими электродами [9–11]. Настоящая работа направлена на решение первой подзадачи.

Одним из наиболее перспективных способов создания зазора требуемых масштабов в 1–2 нм является методика, в которой на чипе-заготовке предварительно формируется система «нависающих» электродов с относительно широким зазором в 50–100 нм, а затем зазоры сужаются в ходе напыления дополнительной золотой пленки [12–14]. Метод характеризуется одновременным формированием самосовмещенного с зазором управляемого электрода, а также возможностью восстановить зазор с использованием метода электромиграции, если напыление дополнительного золота привело к замыканию зазора [14]. Последним свойством, насколько известно авторам, другие литографические методы формирования зазоров не обладают. При этом чем меньше начальный зазор, тем лучше, и фактически ширина его ограничена снизу реальной разрешающей способностью стандартной

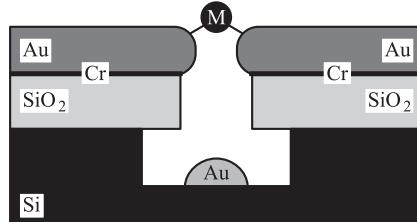


Рис. 1. Схематичный вид одноэлектронного транзистора: молекула M помещена между двумя проводящими электродами; третий электрод (Au, лежащий на кремнии) электростатически контролирует потенциал молекулы

электронно-лучевой литографии. Работа на уровне ее предельных возможностей сильно усложняет всю процедуру изготовления заготовок наноэлектродов, что приводит к значительному снижению выхода годных образцов.

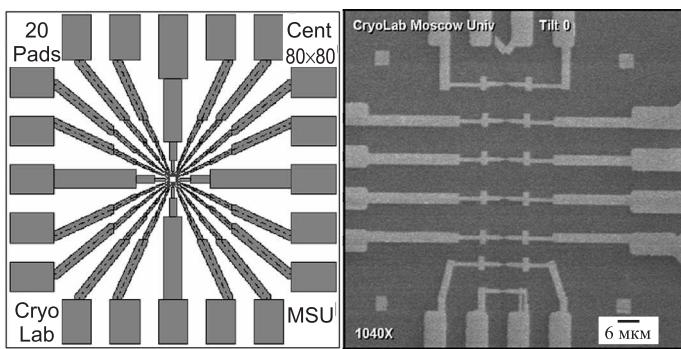
В настоящей работе исследована возможность изготовления заготовок молекулярного одноэлектронного транзистора путем разрезания предварительно сформированных закороченных тонкопленочных золотых электродов сфокусированным ионным пучком. Создание заготовок является промежуточным, но критичным этапом процесса изготовления наноэлектродов молекулярного транзистора. Предлагаемый способ с применением ионного травления характеризуется высокой скоростью проведения и контролируемостью процесса, воспроизводимостью результатов и упрощением предшествующих литографических операций. Это должно привести к значительному увеличению выхода годных образцов, низкие значения которого являются в настоящее время одним из самых существенных препятствий для высокоеффективных исследований мономолекулярных транзисторов.

### Технология

Стандартная кремниевая пластина диаметром 75 мм покрывалась слоем диоксида кремния (толщиной 400 нм) в ходе магнетронного распыления соответствующей ми-

шени в установке Z-400 в смеси газов Ar (давление  $1.2 \cdot 10^{-2}$  мбар) и O<sub>2</sub> (давление  $3 \cdot 10^{-3}$  мбар). Слой оксида кремния служил для изоляции кремниевой подложки от металлической структуры. Далее на подложке формировалась двухслойная маска при последовательном нанесении сополимера/полимера (EL-11/950 PMMA C2). Толщина нижнего слоя составляла 500 нм, верхнего — 50 нм. Спустя день, необходимый для снятия механических напряжений в пленках, подложка разрезалась на чипы размером 10 × 10 мм.

Для создания «внешней» разводки (системы подводящих электродов с характерными размерами 20–1000 мкм, рис. 2, слева) использовалась техника фотолитографии. Слой PMMA засвечивался ультрафиолетом (длина волны 310 нм) через кварцевый фотошаблон с 20 контактными площадками. Чипы проявлялись в смеси толуола и изопропанола в соотношении 1:3 в течение 20 с. Затем образец промывался в изопропаноле и высушивался на центрифуге.



*Рис. 2. Маска «грубой разводки» для фотолитографии с 20 контактными площадками (1 × 1.5 мм) и электродами, ведущими к центральной субмикронной области, в которой помещается исследуемая структура (слева); вид системы закороченных электродов в центральной субмикронной области, засвечиваемой растровым электронным микроскопом, на финальном этапе после напыления 2 нм хрома и 15 нм золота (снимок РЭМ) (справа)*

Формирование нанорисунка (тонкая разводка) проводилось с помощью электронно-лучевой литографии, которая осуществлялась с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) «Stereoscan-240», работавшего при токе электронного пучка 16 пА и ускоряющем напряжении 30 кВ. Для засветки использовалось разработанное в нашей лаборатории программное обеспечение. Рисунок электронной засветки представлен на рис. 2, справа в виде снимка уже сформированной системы электродов в РЭМ. Подчеркнем, что электроды замкнуты, а значит, существенно снижены требования к резистам и точности литографического процесса по сравнению с чисто литографическим способом формирования заготовок с начальным зазором [13, 14]. После окончания формирования системы замкнутых тонкопленочных металлических электродов начальный зазор формируется путем их разрезания сфокусированным ионным пучком в области максимального сужения. После засветки резист PMMA проявлялся 1 мин в растворе толуол:изопропанол 1 : 10, промывался в изопропаноле и высушивался на центрифуге.

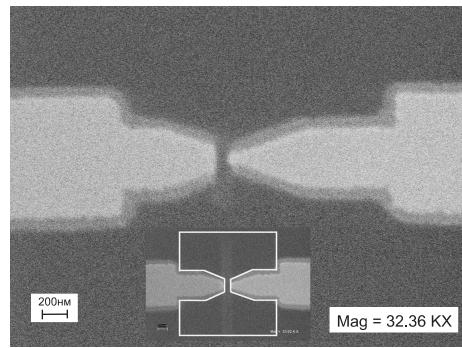
Через сформированную маску в установке «Leibold-560» с использованием терморезистивного метода напылялись пленки хрома (2 нм) для лучшей адгезии золота

(15 нм). Удаление маски происходило по методу «взрыва» при погружении чипов на 24 ч в ацетон. Итоговый вид системы электродов-заготовок представлен на рис. 2, справа.

Приготовленный образец помещался в электронно-ионный сканирующий микроскоп «Nova 600 NanoLab», который позволяет совмещать операции по модификации свойств поверхности ионным лучом с выполнением анализа и контроля технологического процесса электронным лучом. В состав микроскопа входит ионная колонна Magpum с галлиевым жидкокомпьютерным источником ионов, ускоряющее напряжение в которой может изменяться от 5 до 30 кВ; максимальное разрешение микроскопа 7 нм обеспечивается прогрессом в изготовлении источников ионов и фокусирующей оптики [15].

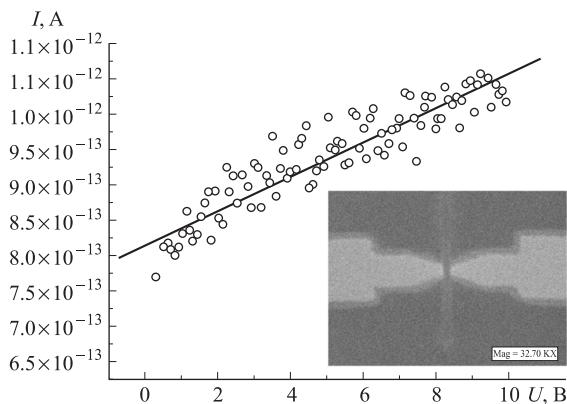
### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов была выполнена серия разрезов пленки электродов в месте их наибольшего сужения. В этой серии были опробованы режимы работы с различными значениями параметров процесса, среди которых основными являлись: энергия пучка, сила тока, размер области распыления и заглубление. Заглубление является одним из стандартных параметров при работе в программной оболочке, входящей в комплектацию микроскопа, и определяет глубину ямы, формируемой в ходе распыления данного типа вещества. Этот параметр наряду с остальными косвенным образом (но автоматически) определяет длительность всего процесса, что и являлось ключевым моментом. Глубина ямы как таковая нас не интересовала, поскольку в первую очередь мы заинтересованы в формировании наиболее узкого зазора. В некоторых случаях процесс при тех же параметрах проводился повторно. Наилучший из полученных в серии результатов, представленный на рис. 3, наблюдался для энергичного сильноточного пучка при ускоряющем напряжении 30 кВ и силе тока 10 пА. Ширина области распыления была задана 20 нм, а параметр заглубления 2 мкм. Длительность процесса при этих параметрах составила 2 с.



*Рис. 3. Зазор (~70 нм) между электродами как результат разрезания закороченных золотых тонкопленочных электродов энергичным сильноточным сфокусированным пучком ионов галлия (масштабный отрезок 200 нм). Энергия пучка 30 кВ, ток 10 пА, ширина «реза» 20 нм, величина заглубления 2 мкм от поверхности подложки. Разрезание производилось при однократном проведении процесса в течение 2 с. На вкладке — область предполагаемого распыления сфокусированным ионным пучком в предлагаемой модификации метода с целью предварительного формирования вертикального профиля системы электродов*

В процессе поиска этого оптимального режима был выявлен ряд эффектов, характерных для использования ионного пучка и требующих внимательного анализа. Так, на рис. 4 (вкладка) представлен зазор (около 75 нм) между электродами заготовки, полученный с помощью разрезания металлической пленки сфокусированным ионным пучком (дважды проведенный процесс длительностью 61 с, ускоряющее напряжение 30 кВ, ток пучка 1 пА, ширина 20 нм, заглубление 2 мкм). В области зазора ясно видна вертикальная полоса, совпадающая с первоначально заданной областью разреза, имеющая более светлую окраску по сравнению с цветом подложки (оксид кремния). Предположительно, распыляемый материал вновь оседает в области зазора.



*Рис. 4.* Зависимость тока утечки в сформированном зазоре (75 нм) от напряжения и его линейная аппроксимация ( $y = ax + b$ ,  $a = 2.4 \cdot 10^{-14} \pm 10^{-15}$ ,  $b = 8.17 \cdot 10^{-13} \pm 7 \cdot 10^{-15}$ ), позволяющая оценить сопротивление. В данном зазоре сопротивление составило  $R_{\text{exp}} \approx 4 \cdot 10^{13}$  Ом. Вкладка: зазор между электродами размером около 75 нм как результат разрезания за-короченных золотых тонкопленочных электродов энергичным сильноточным сфокусированным пучком ионов галлия

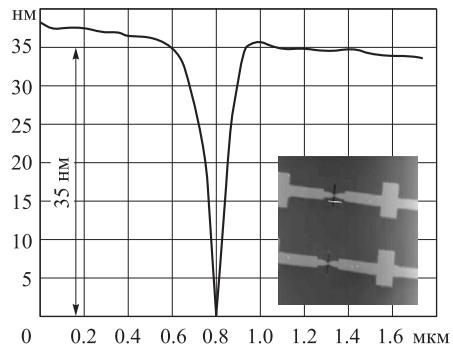
Были проведены электрические измерения, которые показали (рис. 4), что проводимость в зазоре при напряжениях 10 В все же присутствует. Сопротивление зазора  $R_{\text{exp}}$  при этом составило величину порядка  $R_{\text{exp}} \approx 4 \cdot 10^{13}$  Ом.

Было произведено оценочное сравнение табличных значений удельных сопротивлений золота и оксида кремния, на котором располагается структура, с величиной удельного сопротивления зазора, полученного по формуле  $\rho_{\text{exp}} = R_{\text{exp}} \cdot \frac{S}{l}$ , где длина зазора  $l$  была определена из снимка РЭМ и составила порядка 75 нм, а площадь сечения  $S$  оценена величиной  $75 \times 500 \text{ нм}^2$ . Полученное значение составило  $\rho_{\text{exp}} \approx 2 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , что по крайней мере на шесть порядков меньше значений, характерных для удельного сопротивления оксида кремния при нормальных условиях, что в принципе подтверждает наличие переосаждения металла. Однако это же значение больше удельного сопротивления золотой пленки более чем на 12 порядков, что позволяет считать, что если в зазоре и присутствует некоторое количество вещества, то оно по крайней мере не образует сплошную металлическую пленку.

Поскольку дальнейшие этапы рассматриваемого в настоящей работе метода предполагают травление оксидной

подложки в области зазора для обеспечения «нависания» электродов, то эффект переосаждения материала электродов оказывается в целом несущественным для процесса изготовления электродов заготовок в разрабатываемой методике. Однако при использовании иных методов формирования нанозазора, вероятно, данному эффекту следует уделить внимание.

Кроме того, было выявлено, что наблюдаемая полоса связана с распылением самого материала подложки. На рис. 5 представлен профиль поверхности, полученный с помощью атомно-силового микроскопа. Глубина образующейся в ходе распыления «ямы» составила порядка 35 нм. Мы предполагаем, что данный эффект может быть успешно использован в целях формирования вертикального профиля (нависающей структуры) непосредственно в области зазора. Область предполагаемого распыления обозначена по периметру белым цветом на рис. 3 (вкладка). Ранее глубина профиля формировалась с помощью анизотропного реактивно-ионного травления. При этом было выявлено нежелательное распыление металлических электродов, что требовало оптимизации параметров проведения процесса [14], которая достигалась лишь в очень узком диапазоне параметров процесса, что существенно уменьшало его устойчивость и надежность. Предлагаемый метод лишен этого недостатка, поскольку область распыления задается локально, не затрагивая сами электроды, а сам процесс осуществляется *in situ*.



*Рис. 5.* Профиль поверхности для верхнего из представленных на вкладке зазоров, полученный в атомно-силовом микроскопе (АСМ). Глубина «ямы» в оксиде кремния, получившейся в результате распыления, составила порядка 35 нм. Вкладка: снимок двух зазоров в АСМ

## Заключение

Таким образом, предложен и реализован новый подход к изготовлению электродов-заготовок для молекулярного одноэлектронного транзистора с использованием возможностей сфокусированного ионного пучка. Продемонстрирована пригодность метода травления сфокусированным ионным пучком, выгодно отличающегося простотой, управляемостью при задании ширины разреза, скоростью и воспроизводимостью для формирования качественных чипов-заготовок для молекулярного одноэлектронного транзистора с «подвешенными» электродами. Определены оптимальные параметры по разрезанию металлической перемычки электродов, позволяющие получать зазор в 70 нм без видимых повреждений подложки и значительного ее загрязнения. Представляет интерес уменьшение размеров формируемых электродов до минимально доступных для тех-

нологии размеров. Наилучший из известных авторам результатов показал [16], что методом распыления материала сфокусированным ионным пучком удается достичь ширины зазора порядка 20 нм. Такой результат сам по себе недостаточен для создания мономолекулярного транзистора (требуемый размер зазора составляет порядка 1 нм) ввиду значительной ширины зазора. Однако в разрабатываемом нами подходе его достижение позволило бы в ходе нанесения на заключительной стадии изготовления итоговых нанозазоров дополнительной металлической пленки избежать необходимости напылять довольно толстые ( $\sim 100$  нм) золотые пленки, толщина которых должна быть практически равна ширине первоначального зазора [14]. Это существенно увеличило бы экономичность разрабатываемой методики. Поэтому, безусловно, следует продолжить дальнейшую оптимизацию параметров процесса разрезания металлической пленки с целью получения возможно меньших зазоров электродов-заготовок.

Выявленный эффект повторного осаждения распыленного металла в области зазора в нашем случае не представляет опасности, поскольку метод направлен на создание электродов-заготовок и предполагает дальнейшее реактивное травление подложки с целью формирования подвешенных электродов. Выявленная деформация подложки в области создания зазора, связанная с распылением материала подложки (диоксида кремния), также не является в нашем случае критичной. Наоборот, возможно будет использовать сфокусированный ионный пучок для формирования вертикального профиля структуры локально в области зазора *in situ*, а значит, избежать этапа анизотропного реактивного травления, могущего приводить к распылению материала электродов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 06-07-89254-а) и МНТЦ (грант 3457). Авторы

благодарны технологической группе лаборатории криоэлектроники за ценные советы при выполнении эксперимента и обсуждении полученных результатов.

### Список литературы

1. Zeller H.R., Giaever I. // Phys. Rev. 1969. **181**. P. 789.
2. Likharev K.K. // IBM J. Res. Develop. 1988. **32**. P. 144.
3. Reed M.A., Zhou C., Muller C.J. et al. // Science. 1997. **278**. P. 252.
4. Morpurgo A.F., Marcus C.M., Robinson D.B. // Appl. Phys. Lett. 1999. **74**. P. 2084.
5. Strachan D.R., Smith D.E., Johnston D.E. et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. **86**. P. 043109.
6. Jianchun D., Parviz B.A. // Nanotechnology. 2006. **17**. P. 5124.
7. O'Neill K., Osorio E.A., van der Zant H.S.J. // Appl. Phys. Lett. 2007. **90**. P. 133109.
8. Fischbein M.D., Drndic' M. // Nano Lett. 2007. **7**, N 5. P. 1329.
9. Park H., Park J., Lim A.K.L. et al. // Nature. 2000. **407**, N 6800. P. 57.
10. Tuukkanen S., Kuzyk A., Toppari J.J. et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. **87**. P. 183102.
11. Dadosh T., Gordin Y., Krahne R. et al. // Nature. 2005. **436**. P. 677.
12. Bezryadin A., Dekker C. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1997. **15**. P. 793.
13. Steinmann P., Weaver J.M.R. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2004. **22**, N 6. P. 3178.
14. Sapkov I.V., Soldatov E.S., Elensky V.G. // Proc. SPIE. Nanosstructures and Nanodevices. 2008. **7025**. P. 70250P.
15. Introduction to Focused Ion Beams / Ed. by L. A. Giannuzzi, F. A. Stevie. Springer US, 2005. P. 1-12.
16. Blom T., Welch K., Stromme M. et al. // Nanotechnology. 2007. **18**. P. 285301.

### Using focused ion beam for creation of molecular single-electron transistor

I. V. Sapkov<sup>1</sup>, V. V. Kolesov<sup>2a</sup>, E. S. Soldatov<sup>1b</sup>

<sup>1</sup>Department of Atomic Physics, Plasma Physics and Microelectronics; Cryolabatory, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

<sup>2</sup>Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences. Mokhovaya str. 11, build. 7, Moscow 101999, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>kvv@cplire.ru, <sup>b</sup>esold@phys.msu.ru.

Blank-chips for molecular single-electron transistor are created using etching technology with focused ion beam. Etching can be characterized as a process with high speed of production, great reproducibility, soft requirements for prior lithographic operations and rather real possibilities to decrease the width of the gap. Optimal parameters for etching of metal electrodes were founded, so it is possible to create a 70 nm gaps suitable for production of system with overhanging electrodes.

**Keywords:** nanotechnology, molecular transistor, focused ion beam.

PACS: 85.65.+h.

Received 23 December 2008.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2009).

### Сведения об авторах

1. Сапков Иван Владимирович — аспирант; тел.: 939-59-35, e-mail: sterkul@gmail.com.
2. Колесов Владимир Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: kvv@cplire.ru.
3. Солдатов Евгений Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: 939-59-35, e-mail: esold@phys.msu.ru.