

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ НАНОСЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ SI/SiO₂/МЕТАЛЛ С ТРЕКАМИ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Е.Ю.Канюков¹, А.В.Петров¹, С.Е.Демьянов¹, Ю.А.Иванова², Д.К.Иванов², Е.А.Стрельцов²,
А.К.Федотов², D.Fink³, W.R.Fahrner⁴

¹Объединенный институт физики твердого тела и полупроводников Национальной академии наук Беларуси, ул.П.Бровки, 19, 220072 г.Минск, Беларусь, e-mail: Ka.Egor@mail.ru

²Белорусский государственный университет, ул.Ленинградская, 14, 220050 г.Минск, Беларусь

³Hahn-Meitner Institute, Glienicker Str. 100, D-14109 Berlin, Germany

⁴University of Hagen, Haldener Str. 182, D-58084 Hagen, Germany

В настоящее время широко развивается поиск новых технологий, которые позволят уменьшить размеры электронных приборов до нанометрового диапазона [1-2]. В этой связи, возрастает интерес к развитию нетрадиционных технологий формирования наноматериалов, наноструктур и их массивов. Так, в данной работе используется технология треков быстрых тяжелых ионов, связанная с формированием в различных материалах (в частности, в слое оксида кремния) узких и протяженных областей радиационного повреждения («латентных ионных треков») в результате воздействия высокоэнергетических ионов. В дальнейшем, в результате химического травления данных треков, формируются нанопоры, которые могут иметь цилиндрическую либо коническую форму и размеры от 10 до 1000 нм, в зависимости от параметров облучения, условий травления, а также типа подложки [2 - 5].

Особый интерес для современной промышленности представляют новые типы спинтронных материалов и структур, которые можно использовать в магниторезистивных сенсорах, датчиках перемещений, устройствах памяти и др. [6 - 7]. Для создания спинтронных приборов необходимы структуры из магнитных наночастиц или их чередующихся слоев, которые могут обладать гигантским (ГМС) либо туннельным магнитосопротивлением (ТМС), и функционируют при достаточно высоких частотах. Это означает, что спинтронные материалы должны обладать специфическим набором часто взаимоисключающих друг друга свойств: ГМС/ТМС эффектами при комнатной температуре, низкой коэрцитивностью, высокой магнитной проницаемостью, высоким электрическим сопротивлением, а также высоким значением намагниченности. Использование технологии треков быстрых тяжелых ионов для создания данных структур может оказаться весьма перспективным.

Цель данного исследования заключается в разработке и получении новых типов магниточувствительных спинтронных структур на основе протравленных ионных треков в оксидированном кремнии, внутри которых посредством электрохимической технологии формируются однородные наноконпозиции или многослойные наноструктуры с чередующимися слоями из ферромагнитных и немагнитных наночастиц (Рис.1).

Кроме того, при создании указанных магниточувствительных структур планируется использование разработанной ранее технологии TEMPOS («Tunable Electronic Material in Pores in Oxide on Semiconductors» - «Управляемый Электронный Материал с Порами в Оксиде Кремния») [3 - 5], задействующей заполненные металлами и полупроводниками протравленные ионные треки в оксидированном кремнии (Рис.1). Технология TEMPOS используется для создания электронных устройств типа МОП-структур, обладающих нелинейными вольт-амперными характеристиками, в том числе с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В результате комплексных исследований структур типа TEMPOS была

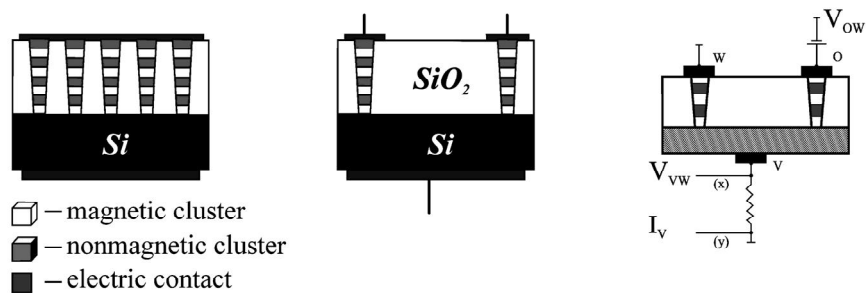


Рис.1. Схематическое изображение магниточувствительных структур, которые создаются с использованием технологии TEMPOS.

показана возможность создания на их основе около 35 электронных устройств, таких как термо-, фото- сенсоры, датчики влажности и алкоголя, усилители, частотные умножители, модуляторы амплитуды, осцилляторы, электронные ключи и другие [3 - 4].

Для получения структур, используемых в нашей работе, посредством стандартной технологии термического окисления (обжиг при температуре 1100 °С в течение 10 часов в атмосфере очищенного кислорода), на поверхности пластины кремния был создан слой диоксида кремния толщиной $0,7 \pm 0,1$ мкм. Затем полученные образцы подвергались облучению ионами $^{197}\text{Au}^{26+}$ с энергией 350 МэВ и флюенсом $5 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ в Центре Технологий Ионных Пучков («ISL») Хан-Майтнер-Института в г.Берлин (Германия). На следующем этапе работы, сформированные в слое SiO_2 латентные ионные треки протравливались плавиковой кислотой (HF) с концентрациями 1.35 % и 2.7 % при 20 ± 1 °С, согласно методикам селективного химического травления.

Процесс селективного травления ионных треков в слое диоксида кремния можно рассмотреть на примере использования плавиковой кислоты с концентрацией 1.35 %. Вследствие различия в скоростях травления облученного и необлученного оксида кремния в слое SiO_2 формируются поры в виде конусов. Процесс травления можно представить в виде следующей схемы (рис.2). На начальных этапах травления на поверхности SiO_2 протравливается небольшой конус (Рис.2а). Вероятно, в вершине этого конуса из-за высокой скорости травления внутри трека формируется тонкая растравленная область, которая достаточно быстро достигает основания Si подложки (Рис.2 б). По мере травления увеличивается диаметр вершины поры ($d_{\text{верш.}}$) и увеличивается глубина, на которую протравливается пора ($l_{\text{поры}}$). При этом происходит также уменьшение толщины слоя SiO_2 , (d_{SiO_2}). Через определенное время (~ 40 мин.) толщина слоя оксида кремния становится равной глубине поры (Рис.2 в). Далее конус травления поры становится усеченным – открывается поверхность Si-подложки (Рис.2 г). Диаметр основания поры ($d_{\text{осн.}}$) с увеличением продолжительности травления постоянно растет, растет и диаметр ее вершины. Так продолжается до тех пор, пока слой SiO_2 полностью не растворится в HF.

Таким образом, были сформированы стохастически размещенные поры в виде усеченных конусов с диаметрами оснований 200 нм (на границе с Si) и 250 нм, и высотой 200 нм. Травление треков осуществлялось на всю глубину слоя SiO_2 , до кремниевой подложки. В дальнейшем, для формирования слоев наночастиц металлов, была применена технология подпотенциального электрохимического осаждения [8], благодаря которой возможно формирование однородных наноструктур и совокупностей нанокластеров металлов, диэлектриков и полупроводников и/или их чередующихся слоев. Данная технология

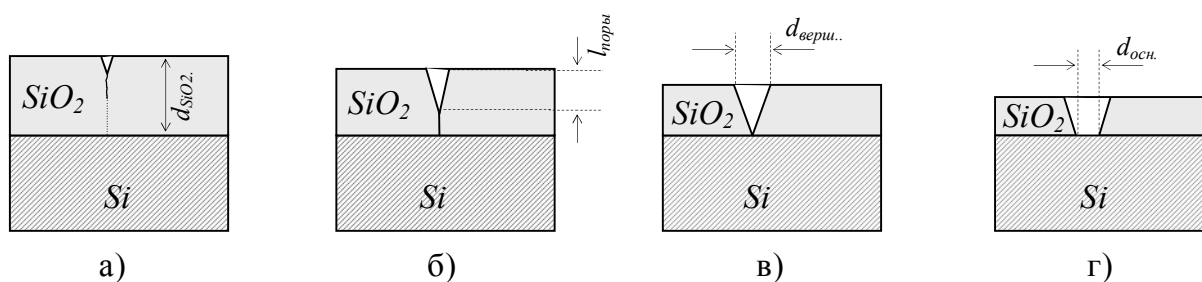


Рис.2. Этапы травления латентных ионных треков в слое SiO_2 на подложке Si.

характеризуется высоким уровнем контроля процесса, включая варьирования структурных параметров, таких как размеры кластера, толщина слоя, последовательность слоев, а также композицию и морфологию осаждаемого материала посредством изменения потенциала электрода. Таким образом, были подготовлены экспериментальные образцы структур с наночастицами Cu и Ni (рис.3, 4). Важно отметить, что данный метод позволяет формировать как однородные наноструктуры, так и совокупности нанокластеров металлов, диэлектриков и полупроводников и/или их чередующихся слоев. Он характеризуется высоким уровнем контроля процесса, включая варьирование структурных параметров, таких как размеры кластера, толщина слоя, последовательность слоев, а также композиции и морфологии осаждаемого материала посредством изменения потенциала электрода. Кроме того, для реализации метода подпотенциального осаждения необходимо простое оборудование, малые энергозатраты, и он является экологически чистым.

В настоящее время, в рамках реализации следующего этапа работ по созданию прототипов магнитных сенсоров, проводятся комплексные электрофизические измерения полученных

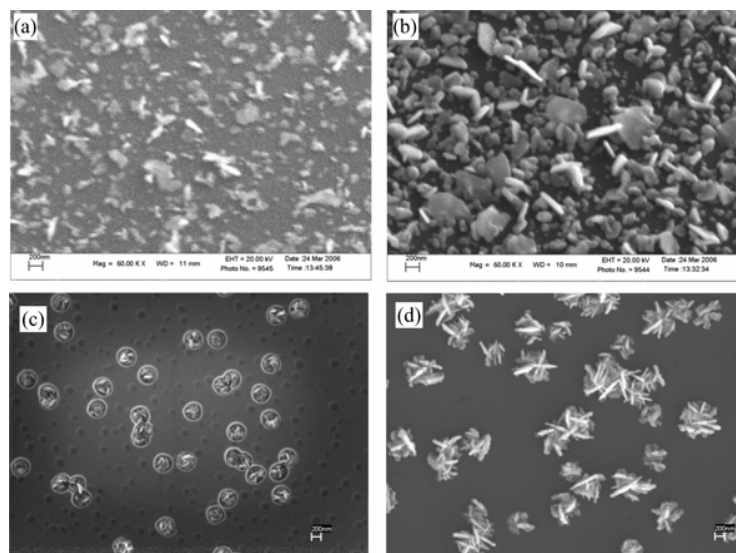


Рис. 3. Изображения сканирующей электронной микроскопии нанокластеров Cu, электрохимически осажденных на поверхность подложек Si (a, b) и в нанопоры системы SiO_2/Si (c, d) из раствора 0,5 моль/л H_3BO_3 + 0.005 моль/л CuSO_4 при потенциале электрода минус 0.5 В в течение 20 с (a, b) и 120 с (c, d).

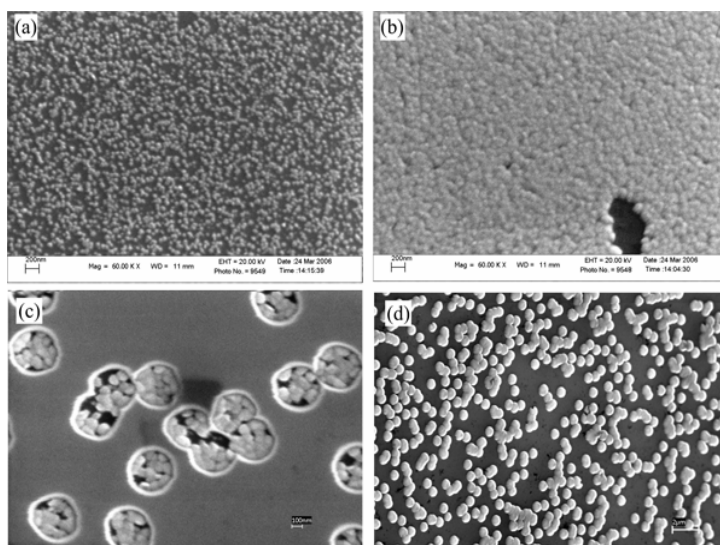


Рис. 4. Изображения сканирующей электронной микроскопии нанокластеров Ni электрохимически осажденных на Si (a, b) и в нанопоры системы SiO₂/Si (c, d) из раствора 0.5 моль/л Н₃ВО₃ +0.5 моль/л NiSO₄ при потенциале электрода минус 1 В в течение 20 с (a, b) и 120 с (c, d).

наноструктур с нанокластерами Cu и Ni в протравленных ионных треках в слоях SiO₂. Первые измерения вольт-амперных характеристик показали их подобие аналогичным измерениям для диодов Шоттки, что соответствует более ранним исследованиям для TEMPOS – структур [3 - 5]. Также планируется изучение электрофизических свойств структур с нанокластерами никеля в магнитных полях напряженностью до 0.5 Т.

Предполагается, что описанные выше наноструктуры, приготовленные с использованием технологии быстрых тяжелых ионов, можно будет использовать в магниторезистивных сенсорах, датчиках перемещений, устройствах памяти и других подобных устройствах.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.L.Fleischer, P.B.Price, R.M.Walker, Nuclear Tracks in Solids. Principles and Applications, Univ. California Press, Berkeley, CA, 1975.
2. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers. Ed. by D.Fink, Springer, **63** (2004).
3. А.В.Петров, D.Fink, W.R. Fahrner, К.Норпе, С.Е.Демьянов, А.К.Федотов, В.В.Малютина-Бронская. Сборник докладов «ФТТ-2005», 482 (2005).
4. D. Fink, A.V. Petrov, K. Hoppe, W.R. Fahrner, R.M. Papaleo, A.S. Berdinsky, A. Chandra, A. Chemseddine, A. Zrineh, A. Biswas, F. Faupel, L.T. Chadderton. Nucl. Instr. Meth., **B218**, 355 (2004).
5. A.V. Petrov, S.E. Demyanov, D.Fink, W.R. Fahrner, A.K. Fedotov, P.S.Alegaonkar, A.S. Berdinsky, "Physics, Chemistry and Application of Nanostructures", World Scientific, 544 (2005).
6. Lecture Notes in Physics, Ed. by Michael Ziese and Martin J. Thornton, Springer, Berlin 2000.
7. В.М.Федосюк, Наноструктурные пленки и нанопроволоки. Изд. центр БГУ, Минск, 2006.
8. D.K. Ivanou, E.A. Streltsov, A.K. Fedotov, A.V.Mazanik, D. Fink, A. Petrov, Thin Solid Films, **490** 154 (2005).