

О МЕТОДАХ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТОВ НА СИСТЕМАХ SiO_2/Si С ЗАПОЛНЕННЫМИ НАНОКЛАСТЕРАМИ Ni и Cu ИОННЫМИ ТРЕКАМИ

ON METHODS OF FORMING CONTACTS ON SiO_2/Si SYSTEMS WITH ION TRACKS FILLED WITH Ni AND Cu NANOCCLUSERS

Белозерцев Ю.В., заместитель директора по науке АО «ВНИИ «Вега», Воронеж, Россия

Belozertsev Yu.V. Deputy Director for Science of VNII Vega JSC, Voronezh, Russia

Омороков Д.Б., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

Omorokov D.B., PhD in Physics and Mathematics, Senior Lecturer, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В работе рассмотрены плюсы и минусы различных методик формирования контактов на системах SiO_2/Si с ионными треками, заполненными нанокластерами ферромагнитных и немагнитных металлов, представлена схема измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) исследуемых образцов, проведен анализ магнетосопротивления при разных внешних условиях (температура, внешнее магнитное поле) в системах $\text{SiO}_2\text{-Si}$ с нанопорами и наночастицами Cu и Ni. Установлена температурная зависимость положительного магнетосопротивления, которое практически исчезает при температурах выше 150 К.

Ключевые слова: напыление, наночастицы, нанопоры, ионный трек, методика, магниточувствительные структуры, модификация поверхности, тонкие пленки, вольт-амперная характеристика, барьер Шоттки, электрическая проводимость.

Abstract. The paper considers the advantages and disadvantages of various methods for forming contacts on SiO_2/Si systems with ion tracks filled with nanoclusters of ferromagnetic and non-magnetic metals, presents a scheme for measuring the current-voltage characteristic (CVC) of the samples under study, and analyzes magnetoresistance under different external conditions (temperature, external magnetic field) in $\text{SiO}_2\text{-Si}$ systems with nanopores and Cu and Ni nanoparticles. The temperature dependence of positive magnetoresistance is established, which practically disappears at temperatures above 150 K.

Keywords: sputtering, nanoparticles, nanopores, ion track, technique, magnetically sensitive structures, surface modification, thin films, volt-ampere characteristic, Schottky barrier, electrical conductivity.

Актуальность выбранного направления исследований обусловлена следующими обстоятельствами. Разработка и получение наноматериалов и нанокомпозитов с заданными физико-химическими свойствами является актуальной задачей современного материаловедения [1]. Электрические датчики в большинстве современных систем реагируют на прямое прикосновение, вызывая физическую деформацию контактного уровня. Это приводит к изменениям в электрической емкости. Однородность ответа на различные области ограничивает чувствительность таких систем. При создании датчика, чувствительного к электромагнитным полям, могут быть использованы наноструктуры на поверхности системы SiO_2/Si с латентными треками [2, 3]. Особый интерес для промышленности представляют новые типы спинтронных материалов и структур, которые можно использовать в преобразователях сигналов: магниторезистивных сенсорах, датчиках перемещений, устройствах памяти и др. Для создания спинтронных приборов необходимы структуры из магнитных наночастиц или их чередующихся слоев, которые могут обладать гигантским либо туннельным магнитосопротивлением и функционируют при достаточно высоких частотах [4, 5]. Исследования в этом направлении позволят спрогнозировать отклик магнитосопротивления на изменение внешних условий. Очень важным фактором, влияющим на ВАХ образцов, является качество электрических контактов и, следовательно, их электропроводность.

Отработаны следующие варианты методики формирования контактов:

1. Прижимные контакты – непосредственное подведение электродов к поверхности изучаемых образцов, с последующей фиксацией их при помощи механического воздействия (прижима). Для изготовления электродов выбирались материалы, обладающие большим модулем упругости (высокоуглеродистая сталь, бериллиевая бронза).

2. Нанесение контактола из индий-галлиевой эвтектики – предполагает нанесение на образцы с обеих сторон. На образцах $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Cu}$ и $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Ni}$ контакты формировали с соблюдением следующего принципа: с тыльной стороны Si наносили контактол из индий-галлиевой эвтектики, а на лицевую поверхность (со стороны SiO_2 с металлом в ионных треках) обязательно напыляли пленку алюминия, а на неё наносили контактол.

3. Нанесение контактола из серебряной эвтектики – предусматривает нанесение на образцы с обеих сторон серебряной эвтектики и последующую сушку при комнатной температуре в течение 12 часов.

4. Напыление алюминия в атмосфере инертного газа – на структуру со стороны Si наносился контактол из индий-галлиевой эвтектики, а на поверхность со стороны SiO_2 с ионными треками, заполненными металлами, методом ионно-лучевого напыления при температуре подложки 400°C напылялся алюминий.

5. Нанесение индия при помощи ультразвуковой пайки – индиевые контакты наносились на образцы с обеих сторон при помощи ультразвуковой пайки (с использованием ультразвукового паяльника УЗП2-0,025 с генератором типа УЗГ-3-04).

Результат анализа опробованных методик показал, что контактол из индий-галлиевой эвтектики, нанесенный на поверхность образца, со временем либо стирается, либо растекается по поверхности, в результате чего затрудняется проведение серии измерений на одном образце. При использовании серебряной эвтектики имеет место плохая адгезия с поверхностью образца, в результате чего наблюдается высокое сопротивление контакта и, кроме того, возможно самопроизвольное отслаивание контактов от поверхности. Использование ионно-лучевого напыления алюминия в атмосфере инертного газа позволяет получать хорошую повторяемость результатов и механическую устойчивость контактов при проведении серии экспериментов на одном образце, однако, при применении данного метода возможно повреждение исследуемой структуры при напылении алюминия на сильно разогретую подложку (образец). Как наиболее оптимальный, выбран метод нанесения индиевых контактов с помощью ультразвука в связи с тем, что он позволяет получить хорошую омичность, повторяемость результатов и механическую устойчивость контактов при проведении серии экспериментов.

Методика нанесения индиевых контактов при помощи ультразвука отличается простотой, дешевизной, меньшим временем, затрачиваемым на формирование контактов, а также является не разрушающей в отношении исследуемых структур. Кроме того, при использовании данной методики появляется возможность получения контактов при помощи пайки, что необходимо при проведении дальнейших исследований, предусматривающих изучение температурных и магниторезистивных характеристик.

Таким образом, для измерений ВАХ использовали индиевые контакты, которые наносили на образцы со стороны матрицы SiO_2 , содержащей поры, заполненные нанокластерами меди и никеля. Измерения проводили в режиме постоянного напряжения в интервале от - 7 до 7 В с шагом 0,5 В с последующей регистрацией тока, протекающего через заполненные металлом треки и контактирующего с ними кремния. Схема измерения представлена на рисунке 1.

Измерения ВАХ экспериментальных образцов в интервале температур от 1,8 до 310 К проводили с помощью 2-х зондового потенциометрического метода на измерительной системе, содержащей рефрижератор замкнутого цикла. Исследования ВАХ структуры $\text{n-Si/SiO}_2/\text{Ni}$ проводились как в магнитном поле $B = 8$ Тл, направленном перпендикулярно поверхности образца, так и без поля.

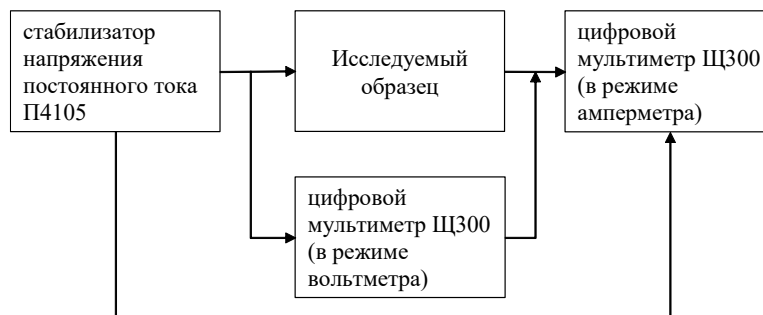


Рисунок 1 – Схема измерения ВАХ исследуемых образцов

Результаты измерений приведены на рисунке 2 для меди и рисунке 3 для никеля. Как видно из рисунков, экспериментальные зависимости качественно подобны друг другу, но имеют более ярко выраженный характер при температуре жидкого азота (Рис. 2а и 3а), чем при комнатной температуре (Рис. 2б и 3б), т.е. при понижении температуры уменьшается и проводимость всей системы.

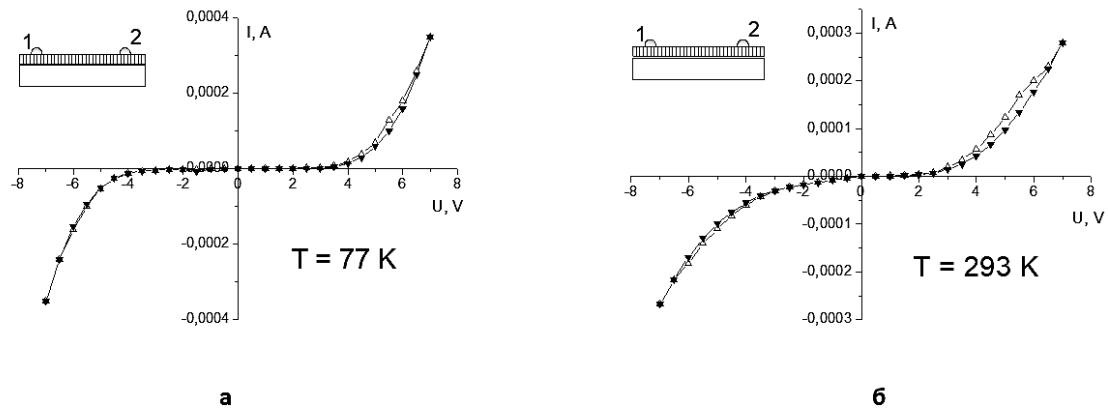


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики образцов с нанокластерами меди в ионных треках при температуре жидкого азота (а) и комнатной температуре (б). На вставках приведены схемы расположения контактов

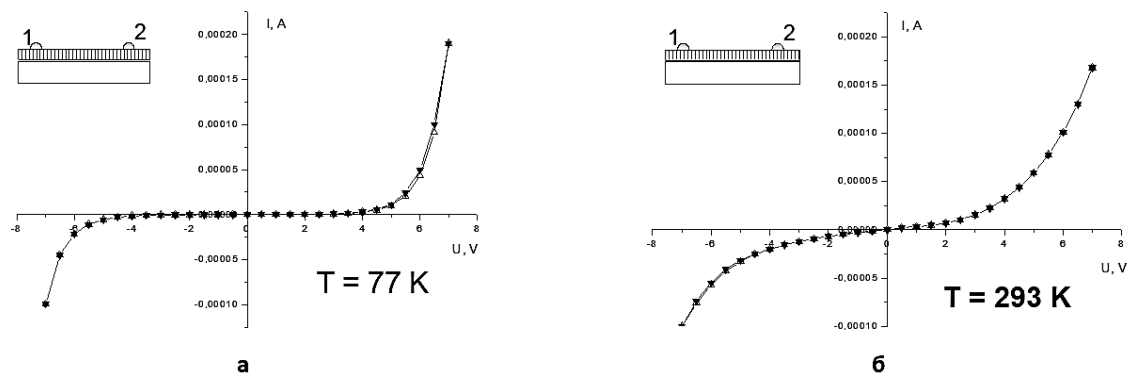


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики образцов с нанокластерами никеля в ионных треках при температуре жидкого азота (а) и комнатной температуре (б). На вставках приведены схемы расположения контактов

Анализ экспериментальных зависимостей в температурных интервалах от 1,8 до 310 К и от 25 до 310 К (Рис. 4) подтверждает данный факт.

При повышении температуры сопротивление барьера Шоттки понижается, и при температурах от 30 до 220 К его величина порядка 10^6 Ом, а в области комнатных температур – порядка 10^5 Ом. Из ВАХ системы n-Si/SiO₂/Ni в широком интервале температур в магнитном поле $B = 8$ Тл видно, что при температурах от 1,8 до 10 К наблюдаются «биения» напряжения (Рис. 4в).

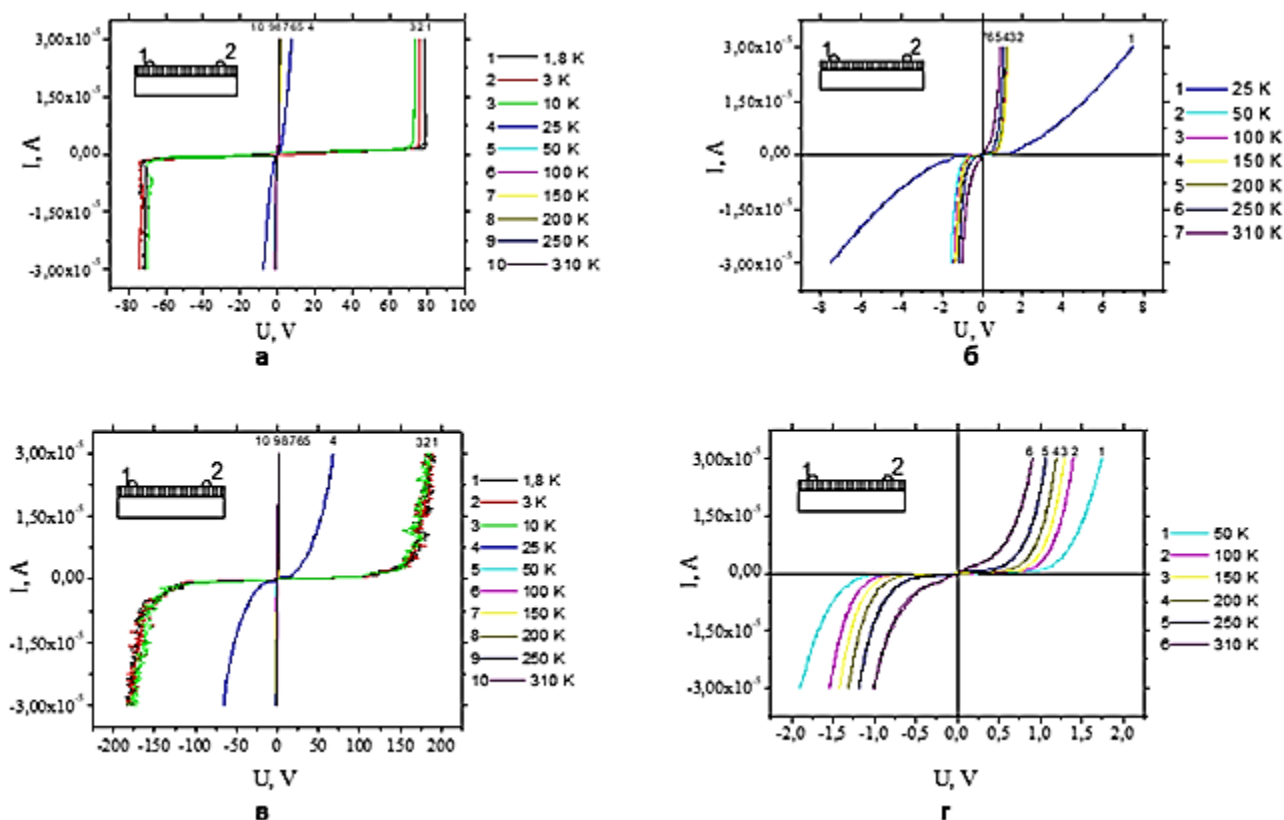


Рисунок 4 – ВАХ структуры n-Si/SiO₂/Ni без поля (а, б) и в магнитном поле $B = 8$ Тл (в, г) в интервале температур 1,8-310 °K (а, в), 25-310 °K (б) и 50-310 °K (г). На вставках приведены схемы расположения контактов

Сравнение поведения исследуемых структур в магнитном поле $B = 8$ Тл и без поля для некоторых температур представлено на рисунке 5.

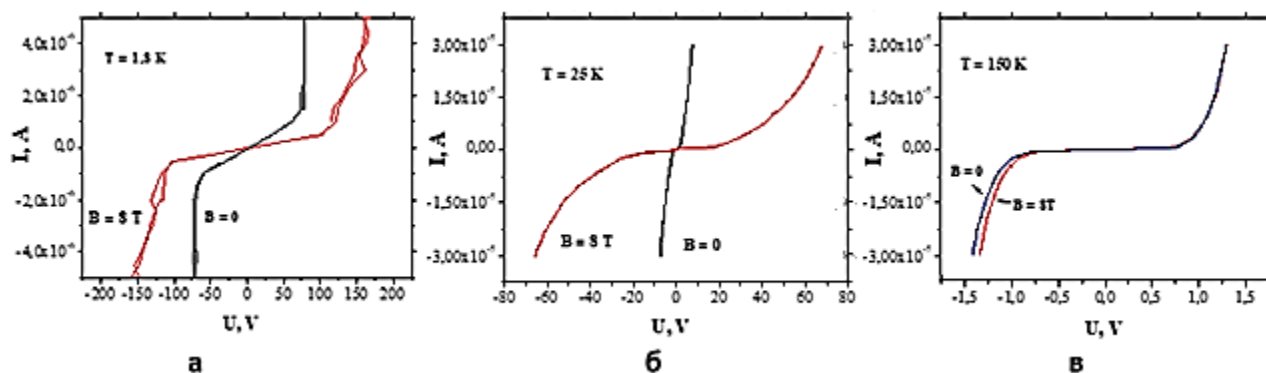


Рисунок 5 – Сравнение ВАХ структуры n-Si/SiO₂/Ni в магнитном поле $B = 8$ Тл и без поля при температурах 1,8 °K (а), 25 °K (б) и 150 °K (в)

Таким образом, анализ экспериментальных данных свидетельствует о температурной зависимости положительного магнетосопротивления, которое практически исчезает при температурах выше 150 К. Качественное изменение магнетосопротивления остается неизменным для наносистем, отличающихся морфологическими и структурными параметрами, но абсолютные значения достигают максимума только для морфологически анизотропных кластеров, имеющих фазовый состав и субструктуру компактных агломератов

нанокристаллов с высокой плотностью дефектов типа двойниковых границ по плоскости (111) ГЦК решетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Создание сенсоров магнитного поля на основе композиционных наноструктур с использованием технологии ионных треков / А.А. Столяров, В.Е. Сахаров, Д.Б. Омороков, Н.Ю. Евсикова // Теория и техника радиосвязи. – 2024. – № 4. – С. 76-81.
2. Омороков, Д.Б. Электрофизические свойства металлического осадка в латентном треке систем SiO₂/Si/ металл / Д.Б. Омороков, Н.Ю. Евсикова // Физические основы современных технологий : материалы Международной научно-методической конференции, Воронеж, 25 октября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. – С. 47-51.
3. Омороков, Д.Б. Особенности осаждения металла на подложку SiO₂/Si с латентными треками / Д.Б. Омороков, Н.Ю. Евсикова // Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : Материалы VIII Международной научной конференции, Донецк, 25-27 октября 2023 года. – Донецк: Донецкий государственный университет, 2023. – С. 142-145.
4. Наноструктуры систем Si/SiO₂/металл с треками быстрых тяжелых ионов / С.Е. Демьянов, Е.Ю. Канюков, А.В. Петров, Е.К. Белоногов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2008. – Т. 72, № 9. – С. 1262-1264.
5. Сахаров, В.Е. Формирование наноструктур на поверхности системы SiO₂/Si с латентными треками для преобразователей сигналов / В.Е. Сахаров, Д.Б. Омороков, Н.Ю. Евсикова // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 4. – С. 55-59.

REFERENCES

1. Creation of magnetic field sensors based on composite nanostructures using ion track technology / A.A. Stolyarov, V.E. Sakharov, D.B. Omorokov, N.Yu. Evsikova // Theory and technology of radio communication. – 2024. – No. 4. – P. 76-81.
2. Omorokov, D.B. Electrophysical properties of metal deposits in the latent track of SiO₂ / Si / metal systems / D.B. Omorokov, N.Yu. Evsikova // Physical foundations of modern technologies: materials of the International scientific and methodological conference, Voronezh, October 25, 2023. – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2023. – P. 47-51.
3. Omorokov, D.B. Features of metal deposition on a SiO₂/Si substrate with latent tracks / D.B. Omorokov, N.Yu. Evsikova // Donetsk readings 2023: education, science, innovation, culture and challenges of our time: Proceedings of the VIII International Scientific Conference, Donetsk, October 25-27, 2023. – Donetsk: Donetsk State University, 2023. – P. 142-145.
4. Nanostructures of Si/SiO₂/metal systems with tracks of fast heavy ions / S.E. Demyanov, E.Yu. Kaniukov, A.V. Petrov, E.K. Belonogov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2008. – Vol. 72, No. 9. – P. 1193-1195. – DOI 10.3103/S1062873808090050.
5. Sakharov, V.E. Formation of nanostructures on the surface of the SiO₂/Si system with latent tracks for signal converters / V.E. Sakharov, D.B. Omorokov, N.Yu. Evsikova // Theory and technology of radio communication. – 2023. – No. 4. – P. 55-59.