07

Порошковые варисторные Ni/Al_2O_3-структуры, сформированные методом прессования

© Д.С. Абрамкин,[1,2] В.А. Селезнев,[1] Б.В. Волошин,[1] В.И. Вдовин,[1] Ю.А. Живодков,[1,2] М.С. Аксёнов,[1] Т.М. Залялов,[1] Д.Р. Исламов,[1] А.Ф. Учуваткин,[2] Д.Н. Клименко[2]

[1]Институт физики полупроводников СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[2]АО „Новосибирский завод радиодеталей „Оксид“,
630102 Новосибирск, Россия
e-mail: dalamber.07@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 15 апреля 2026 г.
Принято к публикации 15 апреля 2026 г.

Изучена возможность получения варисторных структур путем прессования порошка металлического Ni (ПНК УТ-1), частицы которого предварительно покрывались слоем туннельно-прозрачного диэлектрика Al_2O_3. Наращивание диэлектрического покрытия осуществлялось методом атомно-слоевого осаждения с применением установки для формирования планарных структур. Оптимальный режим роста слоев Al_2O_3 отрабатывался на планарных образцах, на лучшем из которых получен однородный по толщине (63 nm) слой Al_2O_3 при температуре подложки 250 °C, а вольт-амперные характеристики структур $Ni/Al_2O_3/Ni$ демонстрируют высокий коэффициент нелинейности (вплоть до 200). Наращивание диэлектрического покрытия в тех же условия на порошках позволило получить слой Al_2O_3 толщиной около 30 nm на поверхности зерен Ni. Из полученного порошка методом прессования сформированы варисторные структуры с коэффициентом нелинейности около 30. Наблюдаемая нестабильная работа варисторных структур Ni/Al_2O_3 обусловлена неоднородностью покрытия Ni-зерен слоями Al_2O_3.

Ключевые слова: варистор, металл-диэлектрический варистор, атомно-слоевое осаждение, порошок никеля, диэлектрические покрытия порошков, туннелирование через треугольный барьер.

DOI: 10.61011/JTF.2026.09.63497.97-26

Введение

Варистор представляет собой устройство с нелинейной симметричной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Его проводимость существенно, на много порядков величины, растет при увеличении прикладываемого напряжения. Для описания ВАХ варистора используют коэффициент нелинейности α, определяемый как:

$$\alpha = \frac{\log\left(I_2/I_1\right)}{\log\left(U_2/U_1\right)}, \qquad (1)$$

где I_1 и U_1 — ток и напряжение на варисторе в высокоомном состоянии, а I_2 и U_2 — в низкоомном состоянии, причем эти величины измеряются вблизи переходной области ВАХ. Большие значения α способствуют более резкому переключению варистора в низкоомный режим. Основное применение варисторы находят в устройствах защиты от перенапряжения и разрядниках. При увеличении внешнего напряжения выше критического уровня варистор переходит в низкоомное состояние, что обеспечивает протекание тока через него.

В настоящее время наиболее распространенными являются металл-оксидные варисторы, для изготовления которых используют порошки ZnO, легированного такими оксидами как Bi_2O_3, V_2O_5, SnO_2, Cr_2O_3, Sb_2O_3, $PrO_{1.83}$, Co_3O_4, Co_2O_3, MnO_2, Nb_2O_5 и Er_2O_3 [1]. Порошки подвергаются прессованию и спеканию при температурах около 900 °C–1350 °C. На полученные заготовки в форме брусков наносятся металлические контакты и изоляционные слои. Коэффициент нелинейности ZnO-варисторов как правило не превышает 100 [1]. Относительно новым типом варисторов является металл-диэлектрический варистор (МДВ) [2,3]. Рабочим телом в таком приборе является металлический порошок с тонким диэлектрическим покрытием.

Как видно на рис. 1, вероятность туннелирования электронов, а значит, и ток варистора резко увеличивается с ростом величины смещения благодаря преобразованию формы потенциального $Ni/Al_2O_3/Ni$-барьера из прямоугольной в трапециевидную, и далее в треугольную. Это обеспечивает резкое переключение в низкоомный режим с ростом напряжения на варисторе. В пионерских работах по МДВ [2,3] использовался порошок Ni и аморфный Al_2O_3 в качестве диэлектрика. Это пара материалов характеризуется значительной высотой энергетического барьера на границе металл–диэлектрик, около 2.5 eV, что способствует резкому росту вероятности туннелирования электронов при подаче смещения на структуру. В данных работах было показано, что коэффициент нелинейности α МДВ Ni/Al_2O_3 может достигать 320, что существенно превосходит α для ZnO- варисторов.

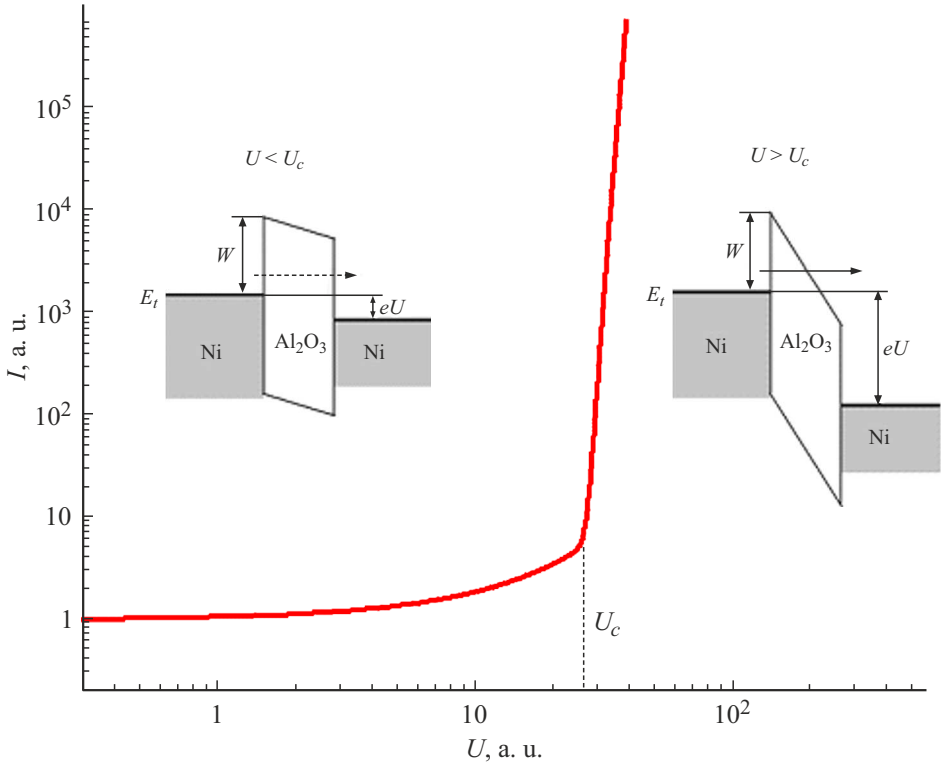

Рис. 1. Схематичная ВАХ металл-диэлектрического варистора. На вставках показаны зонные диаграммы переходов металл–диэлектрик–металл при различных приложенных смещениях.

Также было показано, что время срабатывания МДВ составляет порядка 0.7–1 ns, в сравнении с 25 ns и более для ZnO-варисторов. Это делает МДВ варисторы незаменимыми в высокоскоростных приложениях.

Как видно, обсуждаемые Ni/Al_2O_3 МДВ структуры существенно превосходят по всем ключевым характеристикам традиционные варисторы на базе ZnO. Таким образом, актуальной задачей является разработка метода получения порошков Ni с однородным покрытием зерен тонким слоем Al_2O_3. В работах [2,3] слои Al_2O_3 выращивались на поверхности Ni зерен с помощью метода атомно-слоевого осаждения (АСО) (называемого также „молекулярным наслаиванием“) [4–9]. Данный метод широко применяется для формирования слоев различных диэлектрических материалов. Обработка порошков проводилась в специализированном реакторе, ориентированном на работу с порошковыми материалами [10,11]. К сожалению, АСО реакторы такого типа слишком редки в России, чтобы широко использовать их в технологических процессах. Ранее в работе [12] нами была продемонстрирована принципиальная возможность получения слоев Al_2O_3 на поверхности зерен Ni с использованием традиционного АСО реактора, ориентированного на рост планарных структур. Целью настоящей работы является комплексное изучение варисторных структур, созданных на базе порошков Ni/Al_2O_3, включая их структурные и электрофизические характеристики.

1. Эксперимент

В настоящей работе изучалось формирование покрытия Al_2O_3 как на плоских слоях Ni, так и на поверхности зерен порошка Ni. Изучение структурных и электрофизических свойств плоских структур $Ni/Al_2O_3/Ni$ предваряло исследования порошковых структур с целью отработки режимов роста и выявления особенностей электрофизических характеристик, обусловленных только химическим составов слоев, без учета особенностей сложной поверхности порошков Ni. На последующем этапе отработанные режимы роста были перенесены на рост слоев Al_2O_3 на порошках Ni. После демонстрации возможности формирования сплошного слоя Al_2O_3 на поверхности зерен Ni-порошка были изготовлены варисторные структуры и проведены исследования их электрофизических свойств.

1.1. Ni-структуры, используемые для формирования Al_2O_3-слое

Планарные слои Ni формировались на подложке Si(001) диаметром 100 mm. Для гальванической развязки на подложке методом магнетронного распыления был нанесен слой SiON толщиной около 60 nm. Затем также методом магнетронного распыления проводилось формирование контактного слоя Ni толщиной около 300 nm.

После чего подложка нарезалась на сегменты размером $10 \times 40 - 10 \times 50$ mm.

Для исследования формирования слоев на поверхности зерен Ni-порошка использовался карбонильный Ni-порошок ПНК-УТ1, произведенный ПАО „ГМК „Норильский никель“. Средний размер частиц порошка по Фишеру составляет $5-10\,\mu$m, удельная поверхность 0.31 m^2/g, насыпная плотность 3.0–3.5 g/cm^3.

1.2. Формирование слоев Al_2O_3

Рост слоев Al_2O_3 как на планарных слоях Ni, так и на поверхности зерен Ni порошка проводился методом АСО. Метод АСО заключается в последовательном осаждении различных прекурсоров и продувки ростовой камеры инертным газом для удаления излишков прекурсоров и продуктов реакций:

1) подача триметилалюминия (TMA). Молекулы TMA покрывают обрабатываемую поверхность слоем толщиной до 1 монослоя;

2) продувка камеры инертным газом (например, Ar). Происходит удаление излишков TMA;

3) подача паров H_2O. На поверхности происходит реакция, сопровождающаяся образованием Al_2O_3 и выделением CH_4;

4) продувка камеры инертным газом. Происходит удаление излишков паров H_2O и продуктов реакции CH_4.

Один цикл, состоящий из описанных выше стадий, соответствует формированию слоя оксида алюминия, количество вещества в котором не превышает 1 монослой. Ключевой особенностью метода АСО является ограничение реакции количеством вещества, адсорбированного на поверхность. Это позволяет создавать тонкие, сплошные и однородные покрытия на поверхностях со сколь угодно сложным рельефом [4–11].

В ходе исследований варьировались такие параметры, как температура подложки и количество циклов осаждения. Процессы осаждения проводились при давлении в реакторе 20 Pa и температуре образца 190 °C–250 °C. Количество циклов варьировалось в пределах, обеспечивающих толщину слоя Al_2O_3 от 17 до 63 nm. Аргон высокой чистоты (99.9998 %) использовался в качестве газа-носителя для TMA и H_2O, а также для продувки камеры реактора потоком 100 sccm. Для предотвращения конденсации прекурсоров линии их подачи в реактор нагревались до температуры 100 °C. Контроль впрыска перкурсоров проводился с помощью вакуумметра, подключенного к камере реактора.

Длительности фаз цикла АСО составляли:

1) подача TMA в течение $t_{TMA} = 80$ ms;

2) продувка Ar в течение $t_{Ar} = 20$ s;

3) подача паров H_2O в течение $t_{H_2O} = 80$ ms;

4) продувка Ar в течение $t_{Ar} = 20$ s.

Рост осуществлялся на установке АСО SI ALD LL производства компании Sentech (Германия). Установка предназначена для формирования покрытий на планарных структурах и оснащена оптическим эллипсометром, позволяющим контролировать толщину планарного слоя диэлектрика, растущего на Si-подложке-спутнике. Главной проблемой, возникающей при формировании слоя Al_2O_3 на поверхности зерен порошка Ni в традиционном АСО реакторе, является сложность доставки прекурсоров к поверхности Ni-зерен, имеющих развитую объемную форму и распределенных в толстом слое. Решение этой проблемы потребовало поиска оптимального способа подготовки порошка к ростовому процессу. Для изготовления нескольких варисторных структур было необходимо равномерно распределить около 10 g порошка на площади подложки 300 cm^2. Для этого порошок насыпался на подложку Si диаметром 20 cm через медное сито (ячейка $80\,\mu$m) слоем толщиной около $100\,\mu$m (рис. 2). Контроль средней толщины слоя порошка проводился по весу. С учетом насыпной плотности 3 g/cm^3 масса порошка 10 g соответствует толщине слоя порошка около $100\,\mu$m.

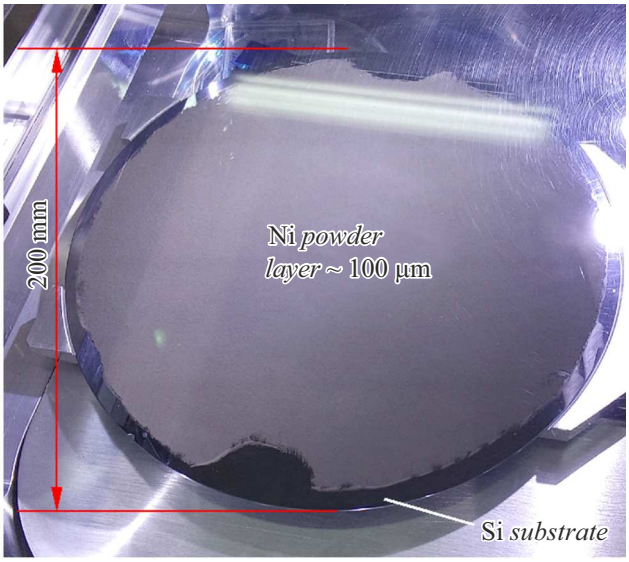

Рис. 2. Фотография порошка Ni, насыпанного слоем около $100\,\mu$m на поверхность Si-подложки.

Поскольку характерные размеры зерен порошка составляют порядка $10\,\mu$m, характерные размеры свободных промежутков между зернами при свободной насыпке будут составлять порядка нескольких микрон. Учитывая, что толщина образующегося на поверхности Ni-зерне слоя Al_2O_3 не превышает 50 nm, разумно предположить, что размеры свободных каналов между зернами существенно не изменятся в процессе роста слоя диэлектрика. В соответствии с результатами работ [13,14] формирование слоя диэлектрика методом АСО возможно внутри каналов с диаметром порядка $1\,\mu$m и длиной до нескольких миллиметров. Это позволило нам предположить, что в нашем случае, при

толщине слоя порошка около 100 μm, прекурсоры будут доставлены до всех зерен в массиве порошка.

1.3. Послеростовые процедуры

Для изготовления катодных контактов на слои Al_2O_3 методом магнетронного распыления наносился слой Ni толщиной 150 nm. Операции по формированию контактных площадок выполнялись методами фотолитографии и плазмохимического травления. Поперечные размеры контактов составляли 1×1 mm.

Формирование варисторных структур из порошка Ni/Al_2O_3 проводилось путем смешивания порошка Ni/Al_2O_3 с порошковой полиэфирной краской N PPU7036.S098 (массовая доля порошка 95 %) и прессования полученной смеси в форме таблетки с усилием 1.7 t/cm^2. Далее проводилось спекание полученной таблетки при 160 °C в течение 30 min. Прессованные таблетки имели размеры: диаметр 10 mm, толщина 1 mm. В целях проверки наличия плотного контакта между зернами Ni дополнительно таким же образом изготавливались структуры из порошка Ni без Al_2O_3-покрытия.

На рис. 3 представлены изображения поперечного среза такой структуры, полученные методом СЭМ. Как видно на рисунке, зерна частично плотно контактируют между собой, но не по всей поверхности. Тем не менее измерения электросопротивления полученных структур показывают закорачивание — величину сопротивления ниже предела обнаружения стандартного мультиметра. Это указывает на то, что полученная плотность соединения зерен достаточна для обеспечения непрерывного протекания тока от одной плоскости структуры к другой.

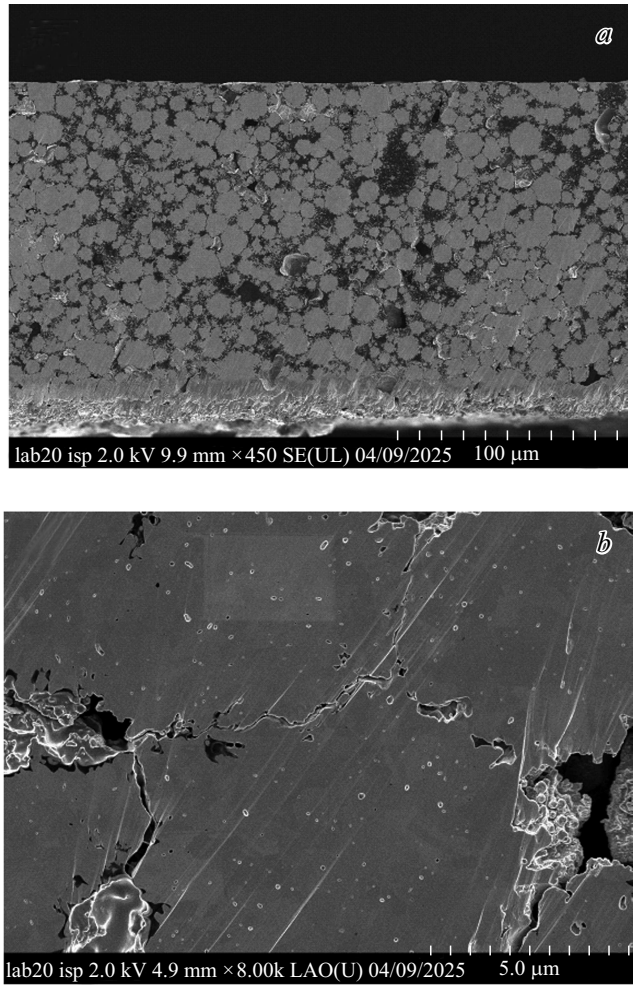

Рис. 3. Изображения поперечного среза структуры, прессованной из Ni-порошка без Al_2O_3-покрытия, полученные методом СЭМ, при различном увеличении.

1.4. Методы исследования Ni/Al_2O_3-структур

Структурные исследования получаемых материалов проводились методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе HITACHI SU8220. В режиме вторичных электронов наблюдалась сплошность и измерялась толщина покрытий Al_2O_3, а также оценивалась плотность упаковки зерен в варисторной структуре. В режиме энергодисперсионного анализа (EDX) регистрировалось пространственное распределение химических элементов на стыке зерен. Исследования варисторных структур, сформированных из порошков, проводились на поперечных срезах, изготавливаемых в середине таких структур путем разрезания алмазной пилой и последующей механической шлифовки и полировки на станке Minimet 1000 (Buehler) до получения зеркально гладкой поверхности. В отдельных случаях финальная полировка среза осуществлялась ионным травлением на установке IM4000 (Hitachi) в режиме плоской полировки.

Измерения статических ВАХ полученных структур Ni/Al_2O_3 проводились при комнатной температуре с помощью параметрического анализатора Keithley 4200-SCS (модуль для измерения ВАХ Keithley 4210-SMU), оснащенного зондовой станцией и оптическим микроскопом. Изготовление электрических контактов осуществлялось путем прижимания контактных медных пластин (площадь 1 mm^2) к противоположным поверхностям прессованных таблеток в местах, предварительно смазанных InGa-эвтектикой.

2. Результаты

2.1. Исследование планарных $Ni/Al_2O_3/Ni$-структур

Слой Al_2O_3 выращивался в течение 500 циклов АСО. СЭМ изображение среза структуры представлено на рис. 4. Очевидно, слой диэлектрика однороден по толщине и не имеет разрывов, что свидетельствует об отсутствии замыкания между металлическими контактами.

Измерения ВАХ плоских $Ni/Al_2O_3/Ni$-структур проводились в диапазоне напряжений 0–10 V с целью опре-

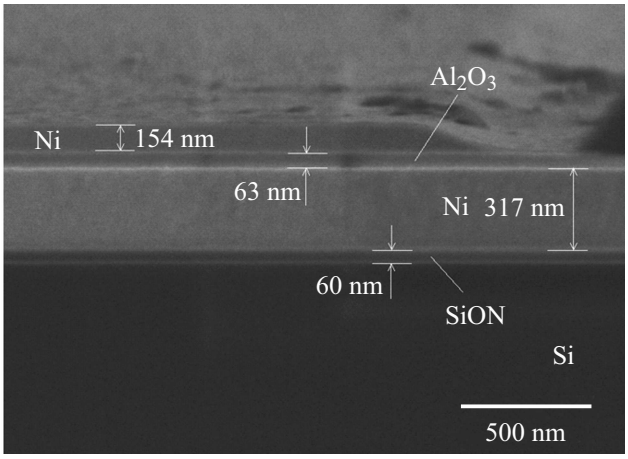

Рис. 4. СЭМ изображение поперечного среза планарной $Ni/Al_2O_3/Ni$-структуры.

делить величину токов утечки. Измерения проведены для 40 контактных площадок 1×1 mm для каждого типа структуры, что позволило получить статистическую информацию и определить процент годных контактов в зависимости от условия формирования слоя Al_2O_3. Годные контакты характеризовались достаточно низкой величиной тока утечки на уровне не выше 2 nA/cm^2 и многократной воспроизводимостью ВАХ. Также были выявлены негодные контакты, ток утечки через которые на несколько порядков величины превосходит ток утечки через годные контакты.

Результаты измерений ВАХ для годных контактов представлены на рис. 5. Как видно на рисунке, ток утечки растет с ростом напряжения по закону, близкому к экспоненциальному. Для структур, выращенных при 190 °C, величины токов утечки при напряжении 10 V составляют 2 nA/cm^2, тогда как для температуры 250 °C эта величина существенно меньше (0.3 nA/cm^2).

Статистический анализ измерений позволил определить процент годных контактов для структур, выращенных при различных температурах. Наилучший выход годных контактов (80 %) демонстрируют структуры, выращенные при 250 °C. Выход годных для структур, выращенных при 190 °C, значительно ниже и составляет < 10 %. Таким образом, полученные данные позволяют утверждать, что оптимальным, с точки зрения минимизации утечек, является рост слоев Al_2O_3 методом термического АСО при 250 °C. Данный вывод хорошо согласуется с результатами работы [15], где обсуждаются электрофизические свойства слоев Al_2O_3, выращенных методом АСО при различных температурах.

Были измерены ВАХ планарных $Ni/Al_2O_3/Ni$-структур со слоями Al_2O_3 различной толщины (17–63 nm) в диапазоне напряжений 0–35 V с целью обнаружения явлений туннельного транспорта носителей заряда через слой диэлектрика. Измерения проводились на годных контактах, которые были определены в ходе измерений токов утечки. На рис. 5, *b* представлены ВАХ для выбранных структур с разной толщиной Al_2O_3 (17, 45 и 63 nm).

При низких напряжениях токи соответствуют величине токов утечки, обсуждаемых выше. При достижении некоторого критического напряжения начинается резкий рост тока. Мы связываем это с преодолением электронами потенциального барьера слоя Al_2O_3 и их

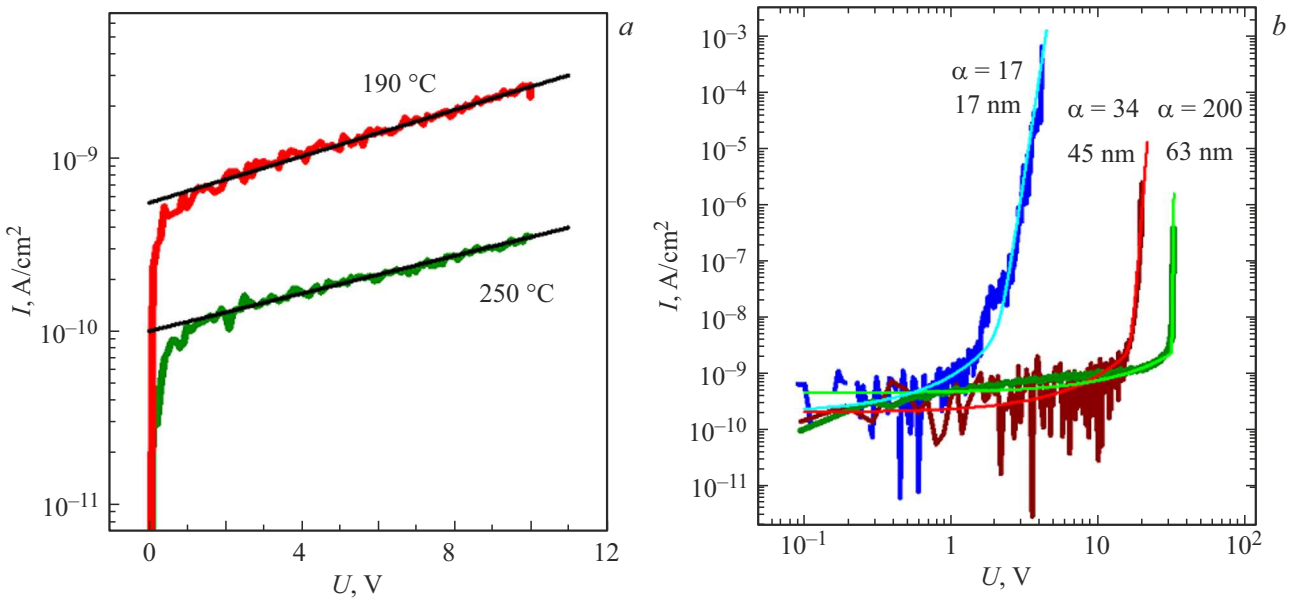

Рис. 5. *a* — ВАХ $Ni/Al_2O_3/Ni$-структур, выращенные методом термического АСО при температуре 190 °C и 250 °C. Темные линии показывают аппроксимацию экспериментальных данных экспоненциальным законом. *b* — ВАХ $Ni/Al_2O_3/Ni$-структур, измеренные в широком диапазоне напряжений. Синим, бордовым и темно-зеленым отмечены экспериментальные данные для слоев Al_2O_3 толщиной 17, 45 и 63 nm соответственно. Сплошные линии соответствуют аппроксимации аналитическими выражениями (2).

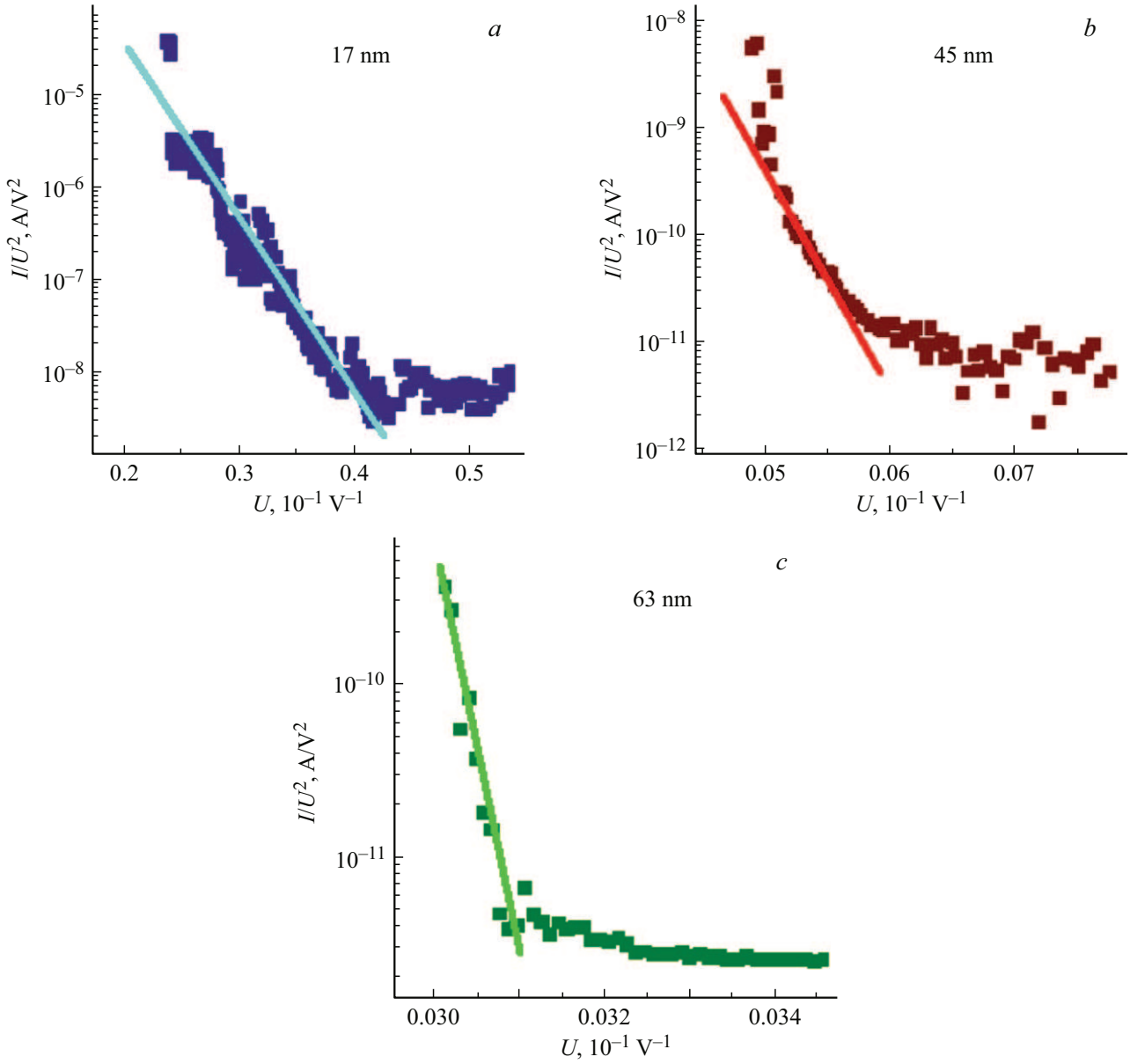

Рис. 6. Измеренные в ходе изучения планарных структур ВАХ, представленные в координатах I/U^2 $(1/U)$.

стабильной инжекцией в диэлектрик ввиду изменения формы потенциального барьера с ростом напряжения. Как видно, увеличение толщины слоя Al_2O_3 ведет к повышению критического напряжения с примерно 1 V при 17 nm, до 16 V при 45 nm и 30 V при 63 nm.

Полученные для планарных структур ВАХ отлично описываются законом $\ln\left(\frac{I}{U^2}\right) \propto \frac{1}{U}$ (с точностью до размерных коэффициентов), как это видно на рис. 6, где эти зависимости представлены в координатах I/U^2 $(1/U)$. Это указывает на то, что в нелинейной области ВАХ ток протекает за счет туннелирования через треугольный барьер и описывается законом, близким к закону Фаулера–Нордгейма [3,16].

С целью определения коэффициента нелинейности ВАХ планарных структур проведена аппроксимация экспериментальных кривых функциями вида:

$$I = A \cdot e^{bU} + B \cdot U^{\alpha}, \tag{2}$$

где первое слагаемое отвечает за токи утечки [17], а второе — за туннельный ток. Согласно работе [17], экспоненциальная зависимость тока утечек от величины электрического поля вызвана туннельными процессами переноса заряда между близкорасположенными фонон-связанными ловушками в диэлектрике. Показатель степени второго слагаемого α соответствует коэффициенту нелинейности варисторной структуры. Как следует из анализа данных (рис. 5), увеличение α с 17 до 200 коррелирует с изменением толщины слоя Al_2O_3 от 17 до 63 nm. Следовательно, толщина слоя диэлектрика в

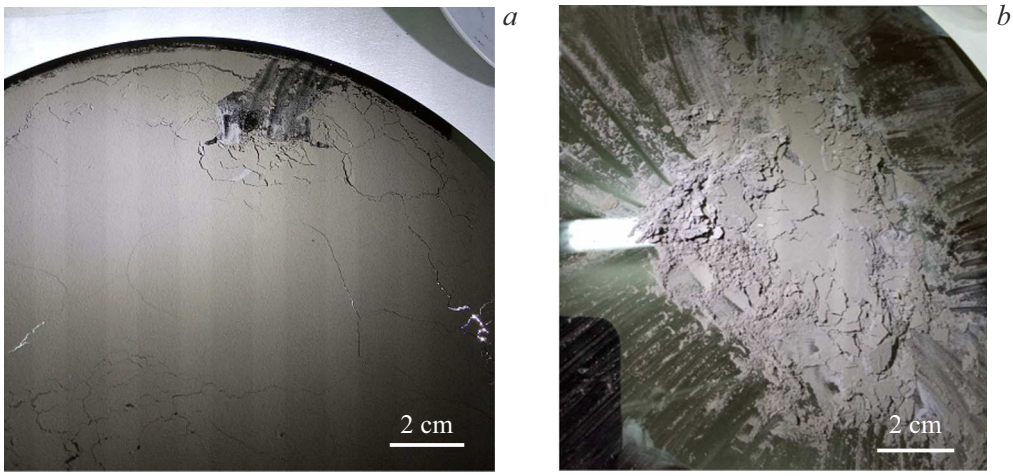

Рис. 7. Фотографии Si-подложки с порошком Ni/Al_2O_3, сделанные: *a* — после извлечения подложки из ростовой камеры и механического разрушения слоя пинцетом; *b* — после собирания основной массы порошка в центр подложки. Вертикальные полосы на фотографиях обусловлены мерцанием устройства освещения.

МДВ влияет как на классификационное напряжение, так и на коэффициент нелинейности варистора.

2.2. Исследование порошковых структур

Порция порошка массой около 10 g была обработана при температуре 250 °C. Рост слоев Al_2O_3 с номинальной толщиной 30 nm проводился в течение 300 АСО циклов. На рис. 7 представлены фотографии массива порошка Ni на Si-подложке после АСО процесса. Визуальный осмотр показал изменение цвета зерен верхних слоев порошка (ориентировочно 30 %–50 % толщины), в то время цвет более глубоких слоев не изменился. Вероятно, что слой Al_2O_3 сформировался на зернах только в верхних слоях порошка и цвет этой области определяется толщиной слоя за счет интерференционных эффектов.

Полученный таким образом Ni/Al_2O_3-порошок был использован для создания варисторных структур методом прессования. На рис. 8 представлены изображения срезов различных зерен порошка Ni, на которых удается разрешить Al_2O_3-покрытие. Видимая толщина покрытия варьируется от 33 до 37 nm, что хорошо соответствует номинальной толщине 30 nm. Однако краевой эффект (яркая светлая полоса по краям частицы Ni) затрудняет точное измерение толщины слоя Al_2O_3 на внешней поверхности зерен. Только в полостях внутри зерен можно наблюдать реальный контраст от слоя Al_2O_3 и точно измерить его толщину.

Наблюдение того же среза варисторной структуры в режиме EDX показало четкое соответствие пространственного распределения Al и O вокруг Ni-частицы с ее геометрическим рельефом (рис. 9). Этот результат однозначно подтверждает, что наблюдаемый во вторичных электронах контраст на поверхности зерен Ni (там, где он регистрируется) действительно соответствует слою Al_2O_3.

Проведены измерения ВАХ прессованных таблеток порошка Ni/Al_2O_3. На рис. 10 представлена одна из типичных ВАХ. Как видно на рисунке, при малых напряжениях ($U < 80$ V) течет ток, обусловленный утечками в диэлектрике, плотность которого не превышает 6 nA/cm^2. Как и в случае с планарными варисторными структурами $Ni/Al_2O_3/Ni$, ток утечки хорошо описывается экспоненциальным законом. Это позволяет утверждать, что утечки по диэлектрику в варисторной структуре также описываются механизмом фонон-облегченного туннелирования между ловушками [17]. Тот факт, что при малых напряжениях наблюдаются только токи утечки через диэлектрик, позволяет утверждать, что доля зерен Ni без Al_2O_3-покрытия, которые могли бы обеспечить закорачивание контактов варисторной структуры в случае выстраивания их в сплошные цепочки, в порошке достаточно мала.

При превышении напряжения порогового значения $U = 81$ V начинается нелинейный рост тока, который продолжается до 95 V. Сопоставляя толщину структуры (1 mm) и средний размер зерна Ni (10 μm), можно оценить ожидаемое среднее количество слоев зерен в структуре как 100. Как показывают результаты исследования планарных структур, при толщине слоя $Ni/Al_2O_3/Ni$ 63 nm пороговое напряжение составляет 30 V. Это позволяет оценить пороговое напряжение варисторной структуры, состоящей из 100 слоев зерен как 3 kV, что на несколько порядков превосходит наблюдаемое пороговое напряжение (81 V). Нелинейный участок ВАХ характеризуется коэффициентом нелинейности $\alpha = 32$, рассчитанному в соответствии с выражением (1). Это значение также заметно отличается от предсказанного на основе результатов изучения планарных структур ($\alpha = 200$). Такое сильное несоот-

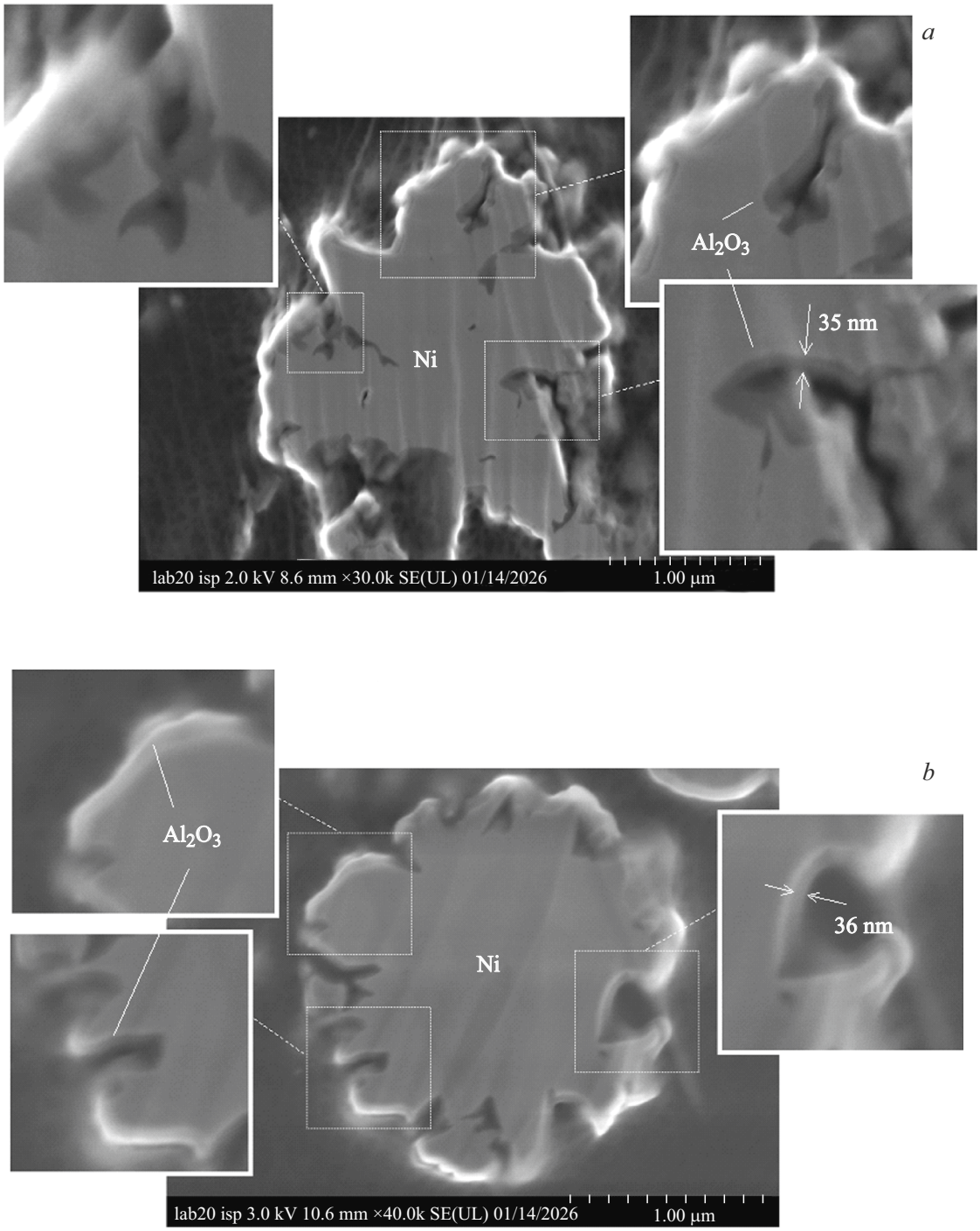

Рис. 8. СЭМ изображения в режиме вторичных электронов срезов Ni/Al_2O_3 зерен с различной формой поверхности с различным увеличением.

ветствие ожиданиям измеряемых величин порогового напряжения и коэффициента нелинейности может быть объяснено наличием заметной доли Ni-зерен, непокрытых слоем диэлектрика. С одной стороны, эти зерна заметно снижают эффективную толщину варисторной структуры, что сказывается на пороговом напряжении, а с другой, в месте контакта покрытого и непокрытого зерна толщина диэлектрика составляет лишь половину от ожидаемых 60 nm. Это может существенно снизить коэффициент нелинейности, что и показывают наши измерения.

После короткого участка нелинейного роста тока при напряжениях свыше 95 V происходит пробой. Повторные измерения показывают, что проводимость приобретает чисто металлический характер с величиной сопротивления около $10^3-10^5\ \Omega$.

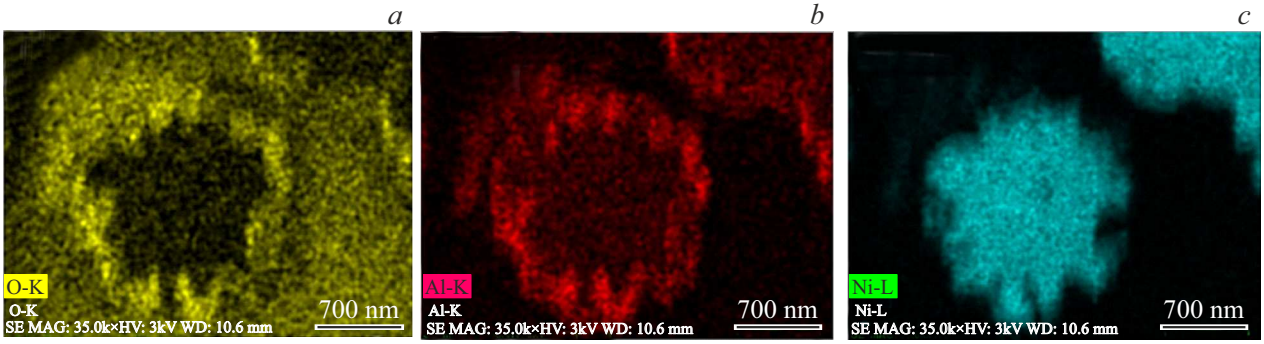

Рис. 9. Пространственные распределения: *a* — кислорода, *b* — алюминия, *c* — никеля на срезе Ni/Al_2O_3-частицы.

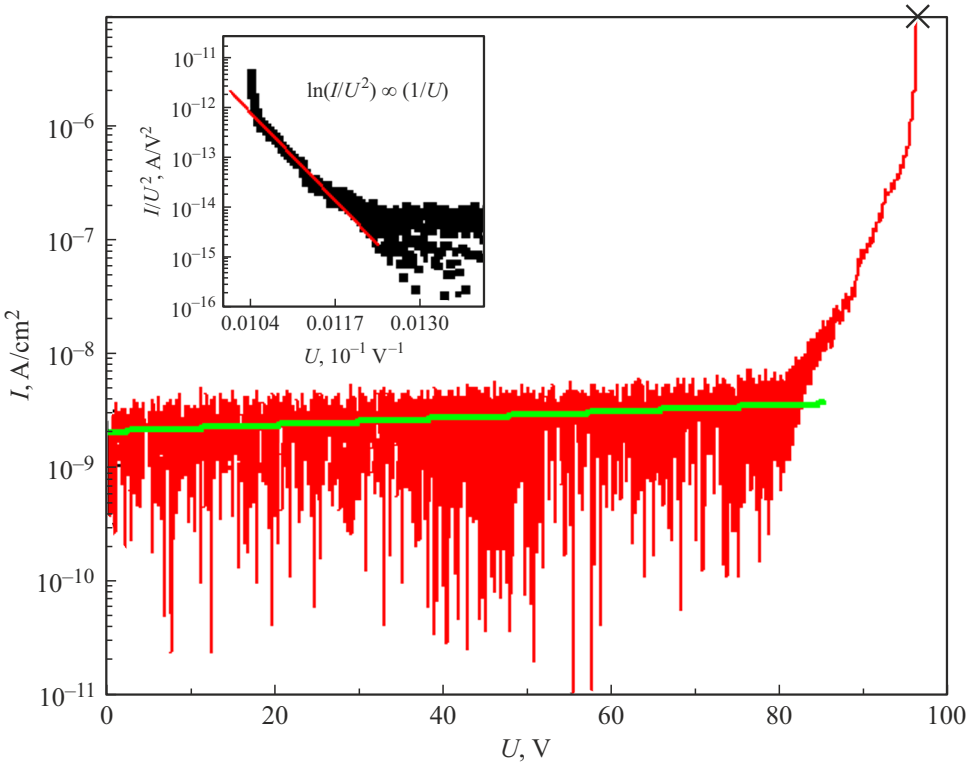

Рис. 10. ВАХ варисторной структуры, измеренная в диапазоне $U < 100$ V. На вставке показан нелинейный участок ВАХ в координатах I/U^2 $(1/U)$.

Анализ ВАХ в координатах I/U^2 $(1/U)$ показал экспоненциальный спад величины I/U^2 от $1/U$, описываемый законом $\ln\left(\frac{I}{U^2}\right) \propto \frac{1}{U}$. Это указывает на то, что ток протекает за счет туннелирования через треугольный барьер и описывается законом, близким к закону Фаулера–Нордгейма [3,16].

Обсуждаемое выше неполное покрытие зерен Ni-порошка слоями диэлектрика может быть также и причиной электрического пробоя структуры. Неоднородность покрытия приводит к неравномерному распределению потенциала, а значит и плотности тока, по структуре. Это может приводить к локальному перегреву и разрушению слоев Al_2O_3, и последующему пробою структуры. Стоит заметить, что к этому также же может приводить и неоднородность сборки зерен порошка Ni/Al_2O_3 в варисторную структуру. Однако этот вопрос требует более детального изучения.

Заключение

Изготовлены планарные $Ni/Al_2O_3/Ni$ и порошковые Ni/Al_2O_3-структуры, исследованы их строение и электрофизические свойства. Рост слотв Al_2O_3 на Ni проводился в реакторе, предназначенном для АСО планарных структур. Определены оптимальные с точки зрения минимизации токов утечки условия формирования слоев Al_2O_3 на Ni — термическое АСО при температуре

подложки 250 °C. Выращенные в этих условия планарные слои $Ni/Al_2O_3/Ni$ характеризуются низкими токами утечки на уровне 0.3 nA/cm^2 при 10 V. Нелинейные участки ВАХ планарных структур $Ni/Al_2O_3/Ni$, описываются законом, близким к закону Фаулера-Нордгейма, что указывает на протекание туннельного тока.

Формирование слоёв Al_2O_3 толщиной 30 nm на поверхности свободных зёрен Ni проведено на слое порошка толщиной 100 μm при равномерном распределении его на Si подложке. Обнаружено, что не все зёрна порошка оказались покрыты слоём Al_2O_3 после проведения циклов роста со стандартными для планарных структур длительностями фаз АСО. Из полученного порошка методом прессования были сформированы варисторные структуры. Изучение электрофизических свойств варисторных структур показало, что их ВАХ качественно похожи на ВАХ одиночных планарных переходов $Ni/Al_2O_3/Ni$. Нелинейный участок ВАХ порошковой варисторной структуры также хорошо описывается законом, близким к закону Фаулера–Нордгейма, и обусловлен протеканием туннельного тока в структуре. Таким образом, продемонстрирована принципиальная возможность получения варисторных структур на основе Ni/Al_2O_3-порошков, слой диэлектрика на которых сформирован методом АСО в реакторе, предназначенном для роста планарных структур.

Финансирование работы

Наращивание слоев Al_2O_3 методом АСО выполнялось на оборудовании ЦКП „Наноструктуры“ при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWGW-2025-0022). Структурные исследования образцов выполнены на оборудовании ЦКП „Наноструктуры“ в рамках государственного задания ИФП СО РАН (FWGW-2025-0014).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Liu, Y. Chen, Y. Cui, Ch. Han, Ch. Zhang, Y. Fan, Ch. Liang. J. Mater. Sci. Mater. Electron., **28**, 2015 (2017). DOI: 10.1007/s10854-016-5759-8

[2] M.A. Weimer, L.F. Hakim, D.M. King, X. Liang, A.W. Weimer, S.M. George, P. Li, M.D. Groner. Appl. Phys. Lett., **92**, 164101 (2008). DOI: 10.1063/1.2913763

[3] M.A. Weimer, A.W. Weimer, W.J. Park. Appl. Phys., **104**, 114516 (2008). DOI: 10.1063/1.3033489

[4] А.А. Малыгин, А.А. Малков, Е.А. Соснов. Журн. неорган. химии, **69** (3), 294 (2024). DOI 10.31857/S0044457X24030046

[5] T.J. Kunene, L.K. Tartibu, K. Ukoba, T.Ch. Jen. Materials Today: Proceedings, **62**, S95 (2022). DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.094

[6] Б.В. Волошин, В.А. Селезнев, В.А. Голяшов. Журн. структурной химии, **65** (10), 134308 (2024). DOI: 10.26902/JSC_id134308

[7] I.V. Antonova, V.A. Seleznev, N.A. Nebogatikova, A.L. Ivanov, B.V. Voloshin, V.A. Volodin, I.I. Kurkina. Phys. Chem. Chem. Phys., **25** (46), 32132 (2023). DOI: 10.1039/d3cp03761d

[8] V.A. Shestakov, V.A. Seleznev, S.V. Mutilin, V.N. Kichay, L.V. Yakovkina. Russ. J. Inorganic Chem., **68** (5), 651 (2023). DOI: 10.1134/s0036023623600491

[9] G.Y. Ayvazyan, M.V. Katkov, M.S. Lebedev, V.R. Shayapov, M.Y. Afonin, D.E. Petukhova, I.V. Yushina, E.A. Maksimovskii, A.V. Aghabekyan. J. Contemporary Phys., **56** (3), 240 (2021). DOI: 10.3103/s1068337221030075

[10] J.R. Wank, S.M. George, A.W. Weimer. J. Am. Ceram. Soc., **87** (4), 762 (2004). DOI: 10.1111/j.1551-2916.2004.00762.x

[11] A.W. Weimer. J. Nanopart. Res., **21**, art. num 9 (2019). DOI: 10.1007/s11051-018-4442-9

[12] Д. Абрамкин, В. Селезнев, А. Петров, В. Вдовин, Ю. Живодков, Д. Клименко. Электроника НТБ, **00251** (9), 56–60 (2025). DOI: 10.22184/1992-4178.2025.251.9.56.60

[13] J. Yim, O.M.E. Ylivaara, M. Ylilammi, V. Korpelainen, E. Haimi, E. Verkama, M. Utriainen, R.L. Puurunen. Phys. Chem. Chem. Phys., **22**, 23107 (2020). DOI: 10.1039/D0CP03358H

[14] D. Longrie, D. Deduytsche, C. Detavernier. J. Vacuum Sci. Technol. A, **32**, 010802 (2014). DOI: 10.1116/1.4851676

[15] S. Kim, S.H. Lee, I.H. Jo, J. Seo, Y.E. Yoo, J.H. Kim. Scientific Reports, **12**, 5124 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-09054-7

[16] R.H. Fowler, L. Nordheim. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, **119** (781), 173 (1928).

[17] К.А. Насыров, В.А. Гриценко. ЖЭТФ, **139** (6), 1172 (2011).