08,02

Эволюция токов утечки в структуре $BiFeO_3/TiO_2(Nt)/Ti$ при кратковременном переключении высокого напряжения на низкое

© Г.М. Гаджиев, Ш.М. Рамазанов¶, Р.З. Зейналов, Т.Н. Эфендиева, Н.С. Абакарова

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН,
Махачкала, Россия

¶ E-mail: ramazanv@mail.ru

Поступила в Редакцию 15 ноября 2025 г.
В окончательной редакции 21 ноября 2025 г.
Принята к публикации 2 декабря 2025 г.

В работе исследовано влияние величины и длительности предварительного поляризующего напряжения на релаксационные токи и вольт–амперные характеристики структуры $BiFeO_3/TiO_2(Nt)Ti$. Использовалась двухступенчатая схема: предварительная поляризация $U_{pol} = 30-55$ V ($t_{pol} = 0.1-4$ sec) и последующее измерительное напряжение $U_{meas} = 0.1-2$ V, в интервале которого регистрировались токи релаксации $J(t)$. Показано, что динамика $I(t)$ и форма J–V-зависимостей существенно модифицируются параметрами U_{pol} и t_{pol}; наблюдаются максимумы тока, инверсия знака при низких напряжениях и N-образные ВАХ. Анализ зависимостей в координатах Шоттки, Пула–Френкеля и тока, ограниченного пространственным зарядом, показал доминирующий вклад механизмов Шоттки и токами ограниченные пространственным зарядом. По напряжению заполнения ловушек оценена концентрация кислородных вакансий, возрастающая при увеличении U_{pol}, что согласуется с дрейфом и накоплением $V\ddot{o}$ у катода. Результаты демонстрируют, что контролируемая предварительная поляризация позволяет целенаправленно изменять проводимость структуры и оптимизировать рабочие режимы мемристивных элементов на основе $BiFeO_3$.

Ключевые слова: $BiFeO_3$, эволюция токов утечки, нанотрубки, тонкие пленки, мемристор.

DOI: 10.61011/FTT.2026.01.62590.325-25

1. Введение

В последнее время структуры металл-диэлектрик (полупроводник)-металл вновь привлекли внимание исследователей по всему миру после провозглашения концепции мемристорного кроссбара, как альтернативы архитектуре фон Неймана [1–3]. Мемристорный (элемент памяти наноразмерного масштаба между двумя электродами) кроссбар — система параллельных нанопроводов, пересекающая другую такую систему под углом, где, в узлах между контактами, размещены сами мемристоры [3]. Благодаря способности мемристора одновременно проявлять свойства энергонезависимого запоминающего устройства, логического устройства и быстродействующего переключателя, стало возможным изготовление процессора нового поколения, в которой проблема эффекта „бутылочного горла фон Неймана“ легко обходится.

Среди тонкопленочных оксидов переходных металлов, рассматриваемых в качестве перспективных материалов при изготовлении мемристоров, особое место занимает полупроводник (диэлектрик) $BiFeO_3$ (BFO). BFO кроме выдающихся мультиферроидных свойств, ранее демонстрировал также и свойства резистивного переключения [4,5]. В ряде работ показано, что для усиления магнитоэлектрического эффекта и увеличения эффективной площади пленки, а также улучшения электрофизических и электрохимических свойств пленок на основе BFO можно использовать буферные слои (в частности, массив нанотрубок TiO_2), что расширяет возможности практического применения этих материалов [6–9].

Токи релаксации, которые возникают в тонкопленочных сегнетоэлектриках сразу после включения/выключения напряжения оказывают существенное влияние на работу элементов памяти, сильно зависят от процессов поляризации и деполяризации, приводя, иногда, к заметной модификации $I-V$-зависимостей. Время релаксации, определяемое из зависимости $I(t)$ после подачи/сброса напряжения на образце является важным параметром активных диэлектриков. На его значение влияют степень совершенства структуры материала, наличие ловушек захвата носителей тока и состояние границы раздела фаз пленочной структуры и может достигать величин от долей секунды до нескольких минут. Соответственно анализ кривой $J(t)$ предоставляет удобный инструмент для характеризации образца на предмет выяснения экстремальных условий эксплуатации элементов памяти при которых наступает деградация пленок. Среди работ, посвященных исследованию влияния предварительного поляризующего напряжения на токи удержания, токи релаксации и $I-V$-зависимости в тонкопленочных сегнетоэлектриках-перовскитах на основе BFO [10–16] наше внимание привлекли результаты, полученные в [15,16]. В этих работах показана сильное отличие

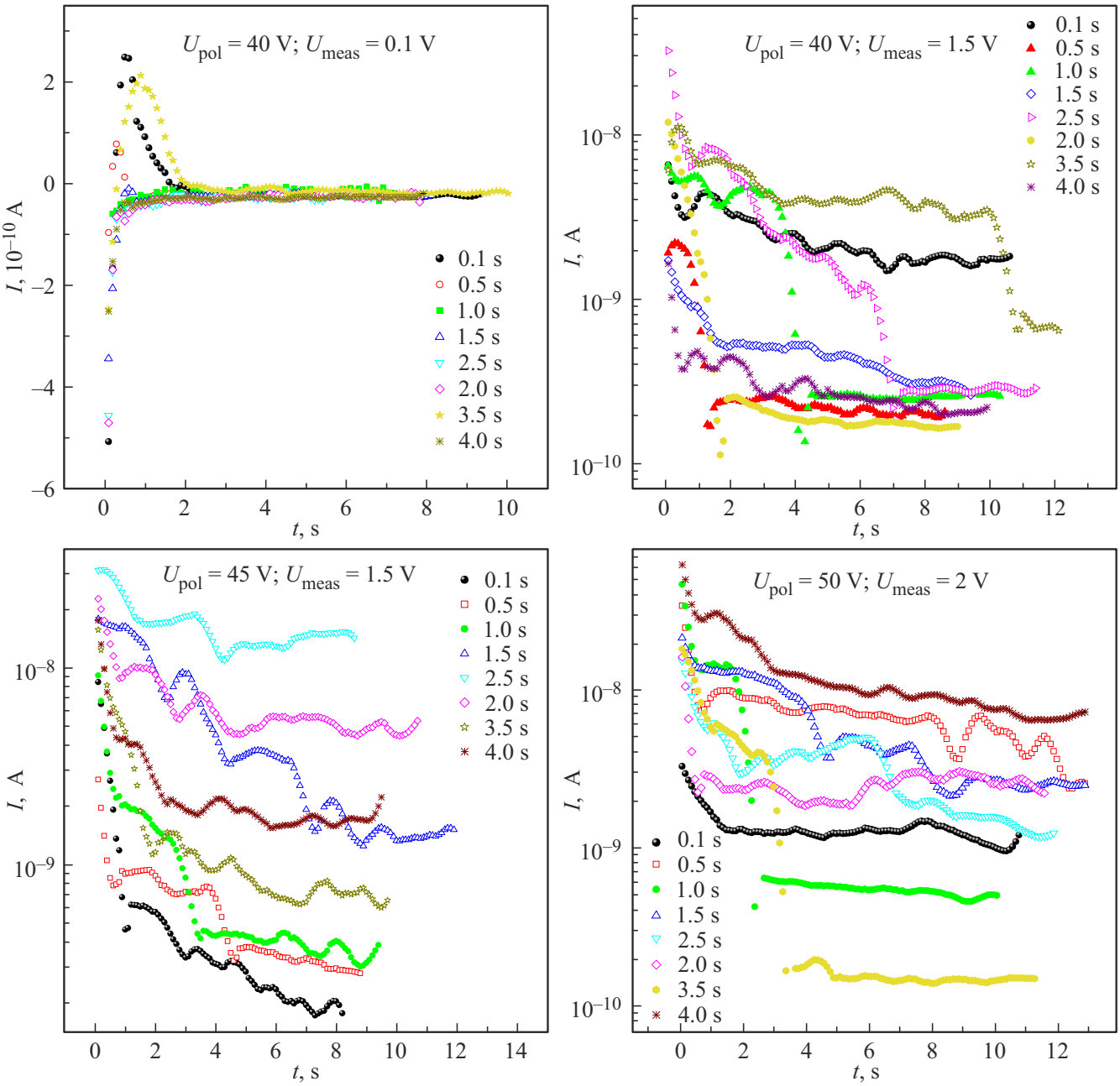


Рис. 1. Динамика изменения токов релаксации при увеличении времени воздействия (указаны справа в рамках) поляризующего напряжения и его величины после переключения напряжения U_{pol} на U_{meas} (указаны сверху в рамках), измеренные при разных U_{meas}.

электрофизических свойств образцов, подвергнутых длительному ($\sim 900-3600$ sec) воздействию электрического напряжения ($\sim 10-15$ V) перед измерениями, от пленок не подвергавшихся такой обработке. Представляет научный интерес модифицировать подход, использованный в [15], то есть повысить напряжение предварительного воздействия до нескольких десятков вольт, понизив при этом время приложения напряжения в интервале 0–5 sec. В данной работе обсуждается влияние величины (30–55 V) и времени воздействия (0.1–4 sec) предварительного поляризующего напряжения на токи релаксации в структуре $BiFeO_3/TiO_2(Nt)Ti$, измеренные в первые несколько секунд после ее сброса до малых измерительных напряжений характерных для условий эксплуатации элементов памяти в области $\sim 0.1-2$ V.

2. Образцы и методика эксперимента

Пленки BFO толщиной 50 nm выращивалось методом атомно-слоевого осаждения (АСО) на установке

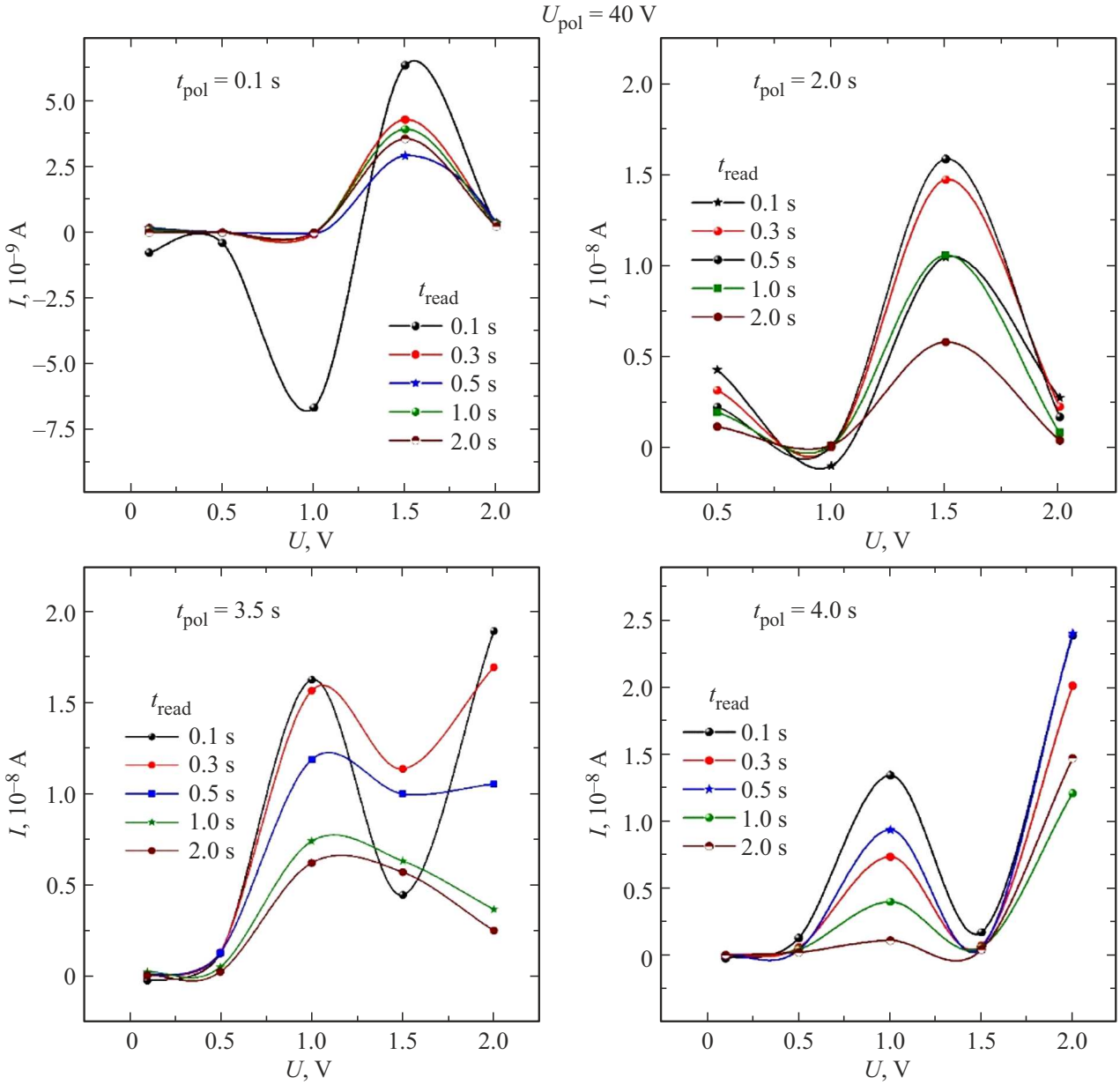


Рис. 2. $I-V$-зависимости образца, сформированные для токов после сброса $U_{pol} = 40$ V на измерительное напряжение U_{meas} из интервала 0.1–2 V для разных t_{read} и t_{pol}. Время считывания тока t_{read} после сброса U_{pol} на U_{meas} и время приложения предполяризующего напряжения t_{pol} указаны в рамках.

ALDCERAM ML-200. В качестве подложки использовалась титановая пластина, на которой предварительно электрохимическим методом была получена пленка $TiO_2(Nt)$ в виде вертикальных нанотрубок. Метод АСО позволяет получать пленки со 100 % конформностью, что актуально для выбранной системы. Толщина слоя $TiO_2(Nt)$ составляла $\sim 2.0\,\mu$m. В качестве источников прекурсоров использовали $Bi(mmp)_3$ (трис(1-метокси-2-метил-2-пропоксивисмут) и ферроцен $Fe(cp)_2$. В методе АСО прекурсоры доставлялись в камеру с помощью газа-носителя N_2 чистотой 99.999 %. Температурный интервал испарения $Bi(mmp)_3$ составлял 135–145 °C, температура испарения ферроцена составляла 90 °C. АСО BiO_x состоял из импульса прекурсора $Bi(mmp)_3$ длительностью 1, 2 sec, далее продувка N_2 напуск импульса O_3 — 5 sec, в промежутке между циклами проводили продувку азотом в течении 15 sec. Затем были применены циклы АСО FeO_x. Длительность импульса прекурсора $Fe(C_5H_5)_2$ — 2 sec. Количество подциклов напуска каждого прекурсора составляло 90. На всем этапе эксперимента входные и выходные газопроводы поддерживались при температуре 150 °C. Подложка располагалась на расстоянии 4–5 cm от входа. Реактор равномерно нагревался до 250 °C. После проводили тер-

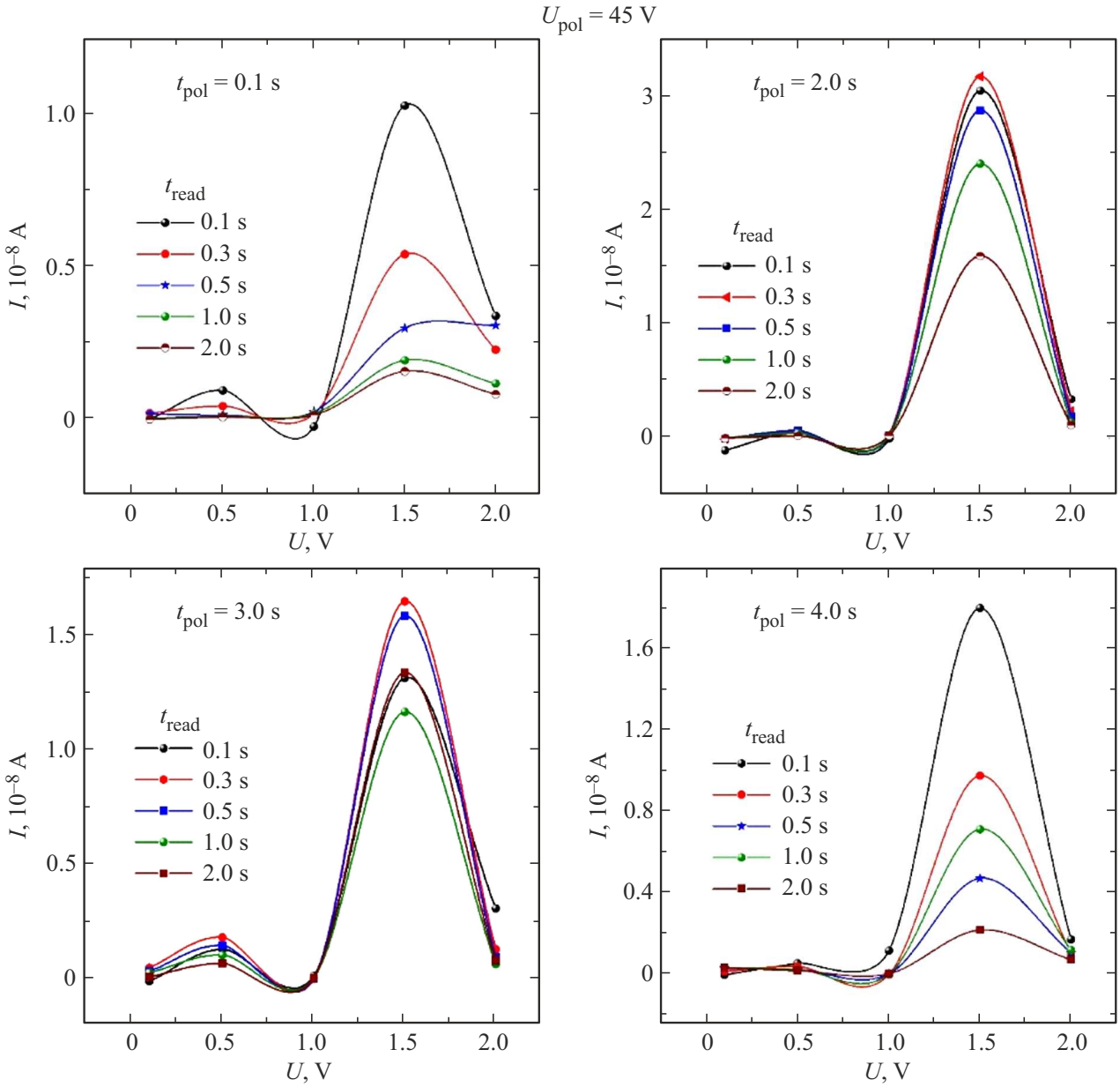


Рис. 3. $I-V$-зависимости образца, сформированные для токов после сброса $U_{pol} = 45$ V на измерительное напряжение U_{meas} из интервала 0.1–2 V для разных t_{read} и t_{pol}. Время считывания тока t_{read} после сброса U_{pol} на U_{meas} и время приложения предполяризующего напряжения t_{pol} указаны в рамках.

мическую обработку полученных образцов на воздухе при температуре 660 °C в течении 60 min. Для проведения электрических измерений контакты наносили методом магнетронного распыления на поверхности, а нижним электродом служила титановая подложка. Более детально экспериментальная часть изготовления данной структуры описана в работе [8].

Измерения релаксационных токов выполнялись на источнике-измерителе Keithley 2400. К образцу прикладывалось двухступенчатое напряжение большой — U_{pol} (30–55 V) и малой — U_{meas} (0.1–2 V) величины. При этом во время действия высокой ступеньки t_{pol} (0.1–4 sec) ток не измерялся — она играла роль формовки или поляризации образца. Измерение тока происходило в момент переключения ступенек $U(t)$ с U_{pol} на U_{meas} в течение времени t_{read} от 0.1 sec до 15 sec. Работа источника-измерителя была автоматизирована в среде LabVIEW; время интегрирования сигнала соответствовала одному периоду сетевого напряжения (1PLC). Верхний электрический контакт создавался прижимным (пружинящим) платиновым электродом с диаметром 0.3 mm на который подавался потенциал смещения, нижним контактом служила титановая подложка с заземлением.

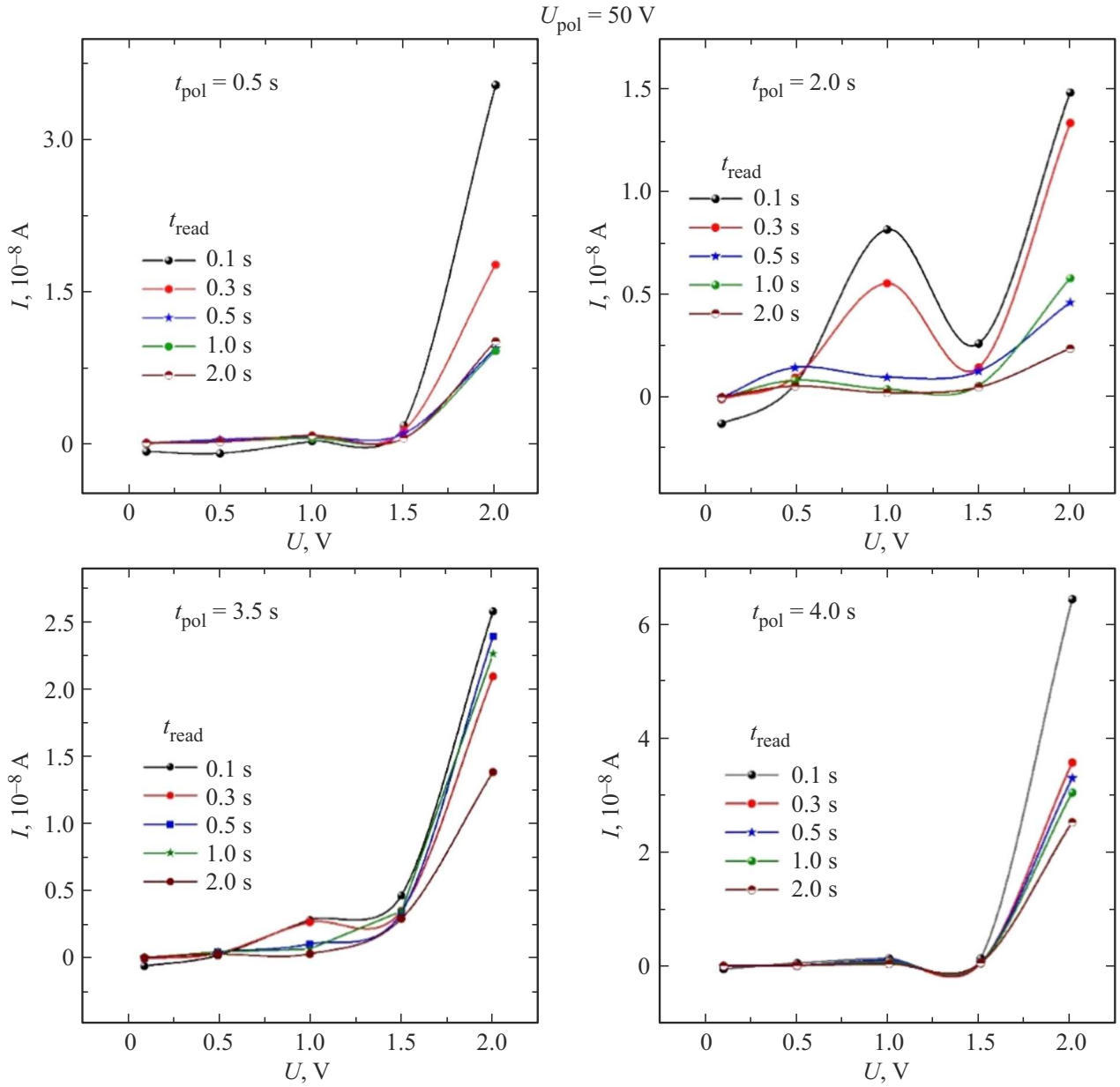


Рис. 4. $I-V$-зависимости образца, сформированные для токов после сброса $U_{pol} = 50$ V на измерительное напряжение U_{meas} из интервала 0.1–2 V для разных t_{read} и t_{pol}. Время считывания тока t_{read} после сброса U_{pol} на U_{meas} и время приложения предполяризующего напряжения t_{pol} указаны в рамках.

3. Результаты и обсуждение

Для анализа влияния предварительной поляризации на динамику релаксационных процессов и формирование проводимости в структуре $BiFeO_3/TiO_2(Nt)Ti$ были исследованы временные зависимости тока после сброса высокого напряжения и построены соответствующие ВАХ при различных режимах воздействия U_{pol} и t_{pol}. На рис. 1 представлена динамика изменения релаксации тока $I(t)$ при вариации величины U_{pol} и времени воздействия t_{pol} поляризующего (формовочного) напряжения, измеренной при различных значениях U_{meas}.

Кривые $I(t)$ для $U_{meas} = 0.1$ V в начальный момент времени характеризуются отрицательным значением, в дальнейшем, с инверсией знака, проходят через максимум. Что говорит о преобладании поля деполяризации, направленного навстречу измерительному U_{meas} в момент сброса U_{pol} до U_{meas} [17]. Область значений токов релаксации, регистрированных при 1.5 и 2 V охватывают коридор, примерно, в два порядка величины для всей линейки времен t_{pol}. Зависимости $I(t)$ на рис. 1 демонстрируют наличие чередующихся участков спада и восхождения тока при общей тенденции к релаксационному типу поведения. Спад и подъем кривых релаксации

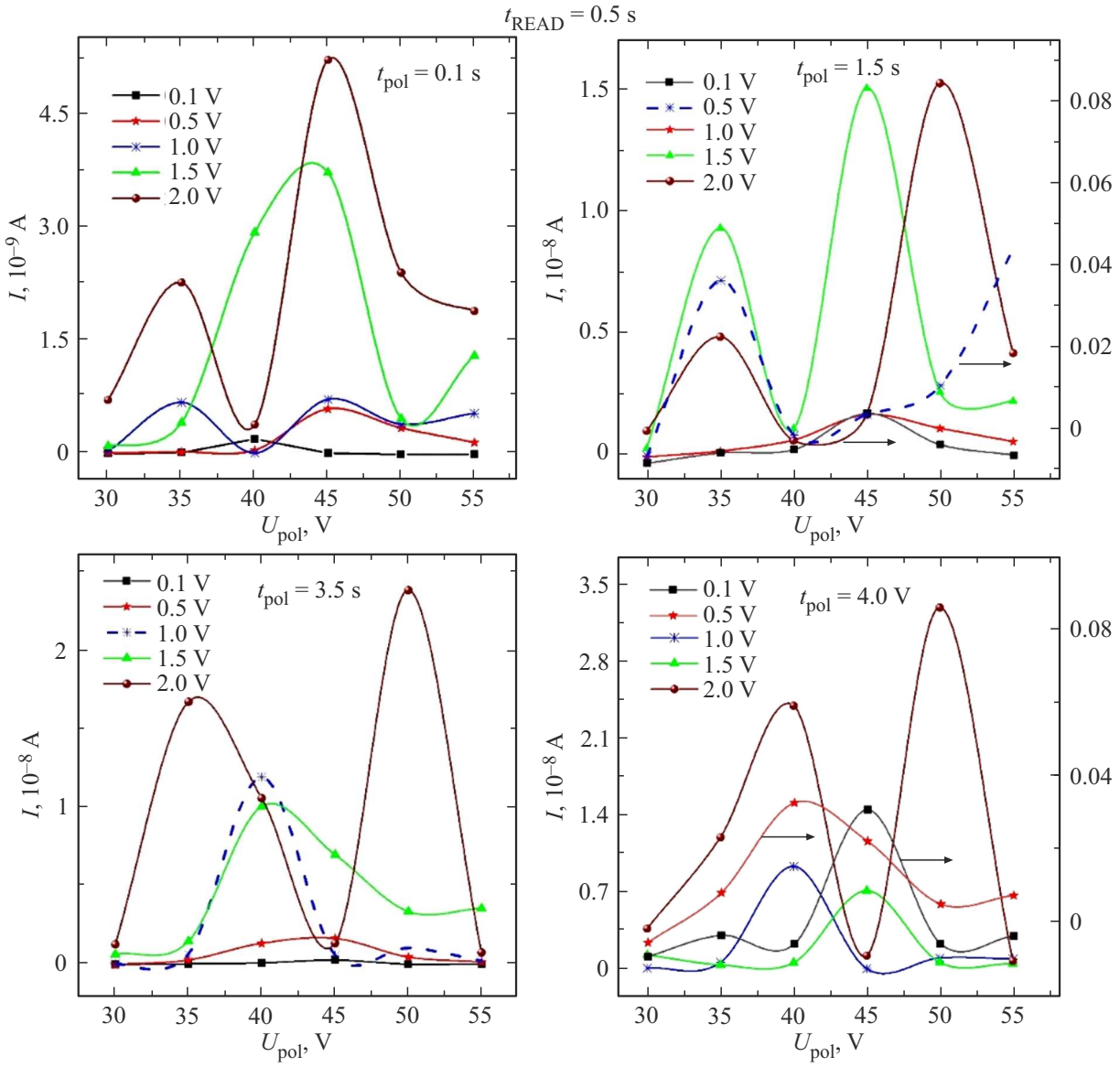


Рис. 5. Влияние напряжений поляризации (формовки) U_{pol} на ток при фиксированном малом напряжении, измеренный через время t_{read} — 0.5 sec после сброса U_{pol} до U_{meas}. Кривые получены для разных времен t_{pol}.

тока BFO интерпретируется как захват и опустошение носителями заряда глубоких (примесных) центров в образце, роль которых играют положительно заряженные кислородные вакансии $V\ddot{o}$, которые неизбежно возникают на одном из технологический стадий изготовления пленочной структуры [15,16]. В дальнейшем, в ходе изложения материала, на рисунках будут представлены зависимости, построенные на основе экспериментально полученных данных (рис. 1). На рис. 2–4 показаны вольтамперные характеристики (ВАХ), составленные для значений тока $I(t)$ при U_{meas} из ряда 0.1–2 V с шагом 0.5 V в момент времени считывания t_{read} после переключения напряжения предварительной поляризации с U_{pol} на U_{meas} (величина и время его приложения t_{pol} указаны на рисунках сверху). Зависимости ВАХ (рис. 2) при времени считывания $t_{read} = 0.1$ sec для t_{pol} — 0.1; 0.5; 1 и 1.5 sec проходят через два максимума с инверсией знака I. Для других значений времени t_{read} ВАХ позиционируются наличием максимума в точке абсцисс — 1.5 V за исключением случаев, когда t_{pol} равны 3.5 и 4 sec, где ВАХ имеют N-образную форму. В случае напряжения предполяризации равной 45 V (рис. 3) $I(U)$ зависимости иллюстрируют выраженные максимумы в окрестности 1.5 V начиная с $t_{pol} = 0.5$ sec, а для $U_{pol} = 50$ V (рис. 4) графики представляют собой экспоненциальную зависимость $I(U)$ кроме случая $t_{pol} = 2$ sec, где имеются N-образные ВАХ разной выраженности.

В целях удобства визуального восприятия процесса влияния предварительного напряжения U_{pol} и времени

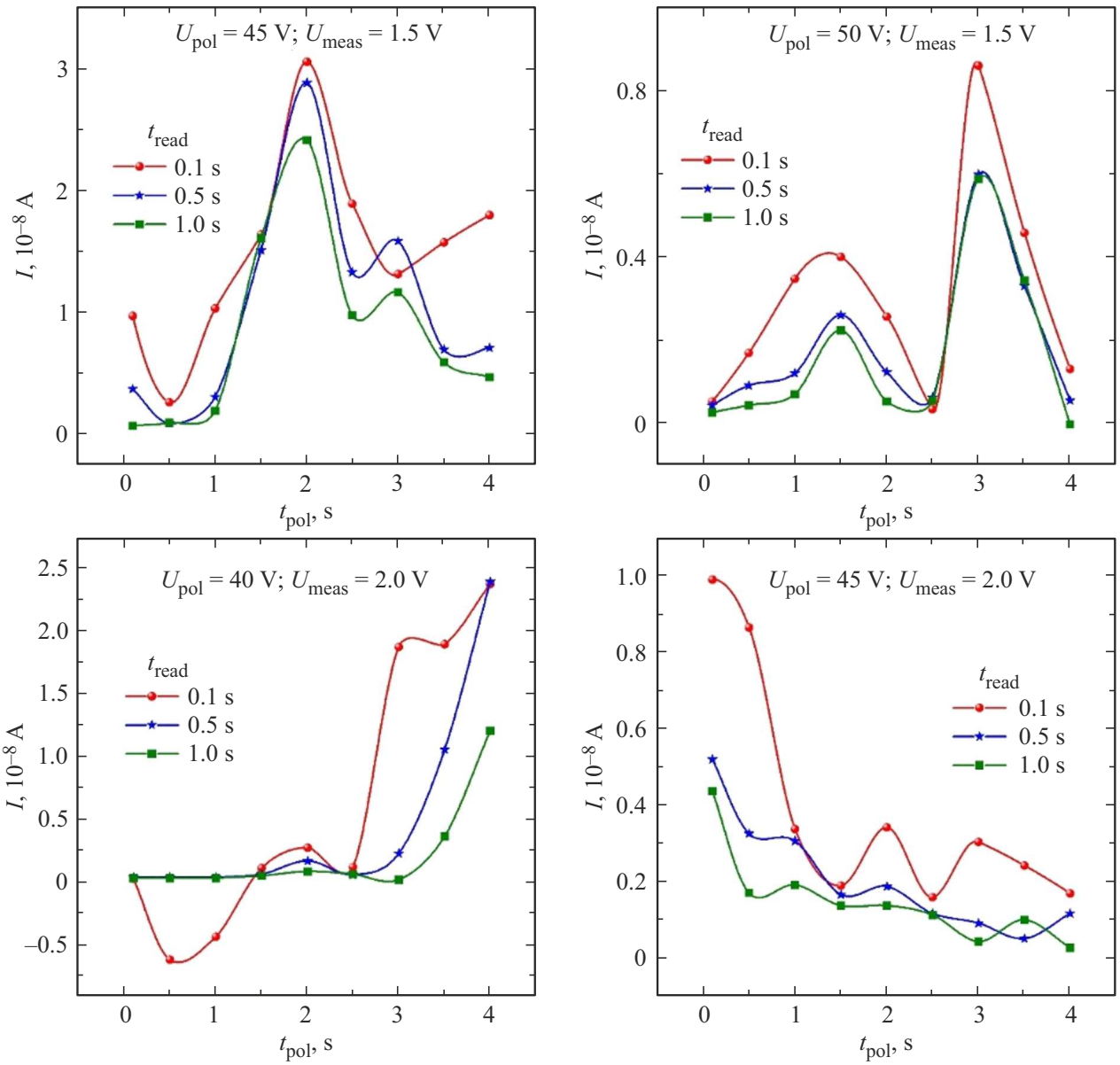


Рис. 6. Влияние времени t_{pol} выдержки напряжения предварительной поляризации U_{pol} на токи релаксации при фиксированном малом измерительном напряжении U_{meas}. Значения соответствующих величин указаны в рамках над графиками.

его воздействия t_{pol} на токи релаксации при различных значениях U_{meas} построены зависимости, представленные на рис. 5. Графики на рис. 5 соответствуют токам релаксации при фиксированном малом напряжении, измеренных через время $t_{read} = 0.5$ sec после переключения предварительного высокого напряжения на малое измерительное. значения токов релаксации достигаются при измерительных напряжениях 1.5 и 2 V, подвергнутых предварительной обработке напряжением 45 и 50 V практически для всего диапазона времени воздействия t_{pol}. За влиянием времени t_{pol} на токи релаксации при выше приведенных параметрах можно проследить на рис. 6, который указывает на неоднозначное поведение тока при вариации времени выдержки напряжения U_{pol}. Кривая $I(t_{pol})$ с параметрами: $U_{meas} = 1.5$ V; $t_{read} = 0.1$ sec; для $U_{pol} = 45$ V имеет максимум в районе ~ 2 sec, который модифицируется в дублетную структуру с уменьшением тока по всей кривой при увеличении U_{pol} до 50 V. Для t_{read} равной 0.5 и 1 sec дублетная структура $I(t_{pol})$ претерпевает изменение соотношения коротковременного и длинновременного максимумов в сторону увеличения последнего при приложении напряжения $U_{pol} = 50$ V. Токи, измеренные при 2 V для U_{pol} — 40 и 45 V показывают противоположную картину: с увеличением времени воздействия $U_{pol} = 40$ V значения токов растут, а для $U_{pol} = 45$ V — наоборот, падают со слабой осцилляцией зависимости $I(t_{pol})$. Кривые $I(t_{pol})$ для случая $U_{pol} = 50$ V проходят через широкий

Параметры ТОПЗ структуры $BiFeO_3/TiO_2(Nt)Ti$

U_{pol}, V	U_{TFL}, V	t_{pol}, sec	R, Om	RC, sec	σ, $Om^{-1}m^{-1}$	$\varepsilon\varepsilon_0$, F/m	N_t, m^{-3}
40	0.5	3.5	$6 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^{-3}$	$0.43 \cdot 10^{-7}$	$1.29 \cdot 10^{-10}$	$0.19 \cdot 10^{21}$
45	1.0	4	$8.3 \cdot 10^7$	$4.1 \cdot 10^{-3}$	$0.32 \cdot 10^{-7}$	$1.29 \cdot 10^{-10}$	$0.38 \cdot 10^{21}$
50	1.5	3.5	$8 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^{-3}$	$0.33 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$1.2 \cdot 10^{21}$

максимум на начальном участке зависимости при этом заметно растет ток для всех кривых.

Ранее нами были продемонстрированы [9] мемристивные свойства, исследованных образцов, которые, в большинстве случаев, обусловлены возникновением и разрушением проводящих филаментов в результате действия формовочного напряжения. На рис. 7 показана ВАХ от полученной структуры которая подтверждает мемристивное поведение. С этой точки зрения допустимо предположить, что рост кривых $I(t_{pol})$ для $U_{pol} = 40\,V$ и $U_{meas} = 2\,V$ (рис. 6) связан сформированием проводящего канала при относительно длительном ($t_{pol} > 2\,sec$) воздействии предполяризационного напряжения, а уменьшение токов утечки в случае $U_{pol} = 45\,V$ — частичным разрушением филаментов при длительном воздействии формовочного напряжения.

Полевая эмиссия Шоттки и токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ, SCLC) являются одними из основных механизмов переноса электрических зарядов в структуре металл-диэлектрик(полупроводник)-метал (МДМ). Уравнение эмиссии Шоттки дается следующим выражением [18]:

$$J_s = AT^2 \exp\left[\frac{W_b}{kT} - \frac{1}{kT}\left(\frac{q^3 V}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 d}\right)^{1/2}\right], \qquad (1)$$

где A — постоянная Ричардсона, W_b — высота потенциального барьера без учета его понижения силами электрического изображения, ε — диэлектрическая проницаемость материала пленки в оптической области, ε_0 — диэлектрическая постоянная, d — толщина пленки, V — внешнее напряжение, q — единица заряда, k — постоянная Больцмана, T — температура.

Анализ наиболее типичных экспоненциальных кривых (рис. 4, $t_{pol} = 3.5\,sec$), построенных в координатах Шоттки $\ln(I) - E^{1/2}$, Пула–Френкеля $\ln(I/E) - E^{1/2}$ и ТОПЗ $\ln(I) - \ln(E)$ показал, что указанные зависимости лучше аппроксимируются прямой для механизма Шоттки и ТОПЗ (рис. 8). Для случая 40 V предварительного напряжения восходящая ветвь максимума ВАХ на рис. 2 ($t_{pol} = 3.5\,sec$), лучше аппроксимируется прямой в координатах ТОПЗ. Это свидетельствует о совместном участии механизмов Шоттки и ТОПЗ в токопроводимости исследованных образцов.

Напряжение резкого роста тока на ВАХ при длительном ($t_{pol} > 3\,sec$) воздействии предполяризующего напряжения (рис. 2) смещается от значения 0.5 V до 1 V (рис. 3) и до 1.5 V (рис. 4) при увеличении величины предполяризующей ступеньки, прикладываемого к образцу напряжения $U(t)$. Развивая идею работы [15] об аккумуляции положительно заряженных кислородных вакансий у катода, в результате их движения по направлению электрического поля, логично предположить, что увеличение времени действия и величины предварительного напряжения должно привести к повышению концентрации вакансий кислорода в прикатодной области TiO_2.

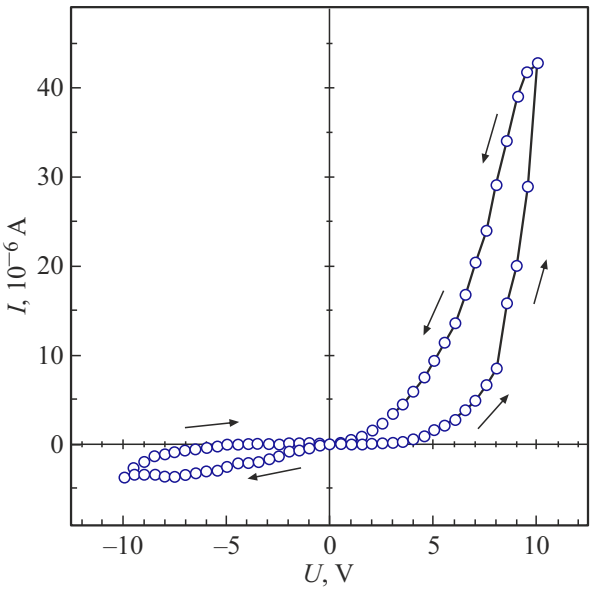


Рис. 7. ВАХ структуры $BiFeO_3/TiO_2(Nt)Ti$, мемристивное поведение.

При механизме ТОПЗ напряжение резкого роста тока на ВАХ — U_{TFL} связано с концентрацией ловушек захвата электронов N_t (в нашем случае — кислородные вакансии) соотношением [19]:

$$U_{TFL} = \frac{qN_t d^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}. \qquad (2)$$

Для нахождения $\varepsilon\varepsilon_0$ мы пользовались максвелловским временем релаксации $\tau = RC = \varepsilon\varepsilon_0/\sigma$; значения R определяли в максимумах ВАХ (рис. 2–4) для длительности приложения U_{pol} больше 3 sec. Используя следующие параметры: толщина пленки $d = 2.05 \cdot 10^{-6}\,m$; площадь электрода $S = 0.78 \cdot 10^{-6}\,m^2$; электроемкость $C = 10\,pF$ были вычислены N_t из (2) для случаев предварительного напряжения 40 V, 45 V и 50 V. Результаты вычислений представлены в таблице.

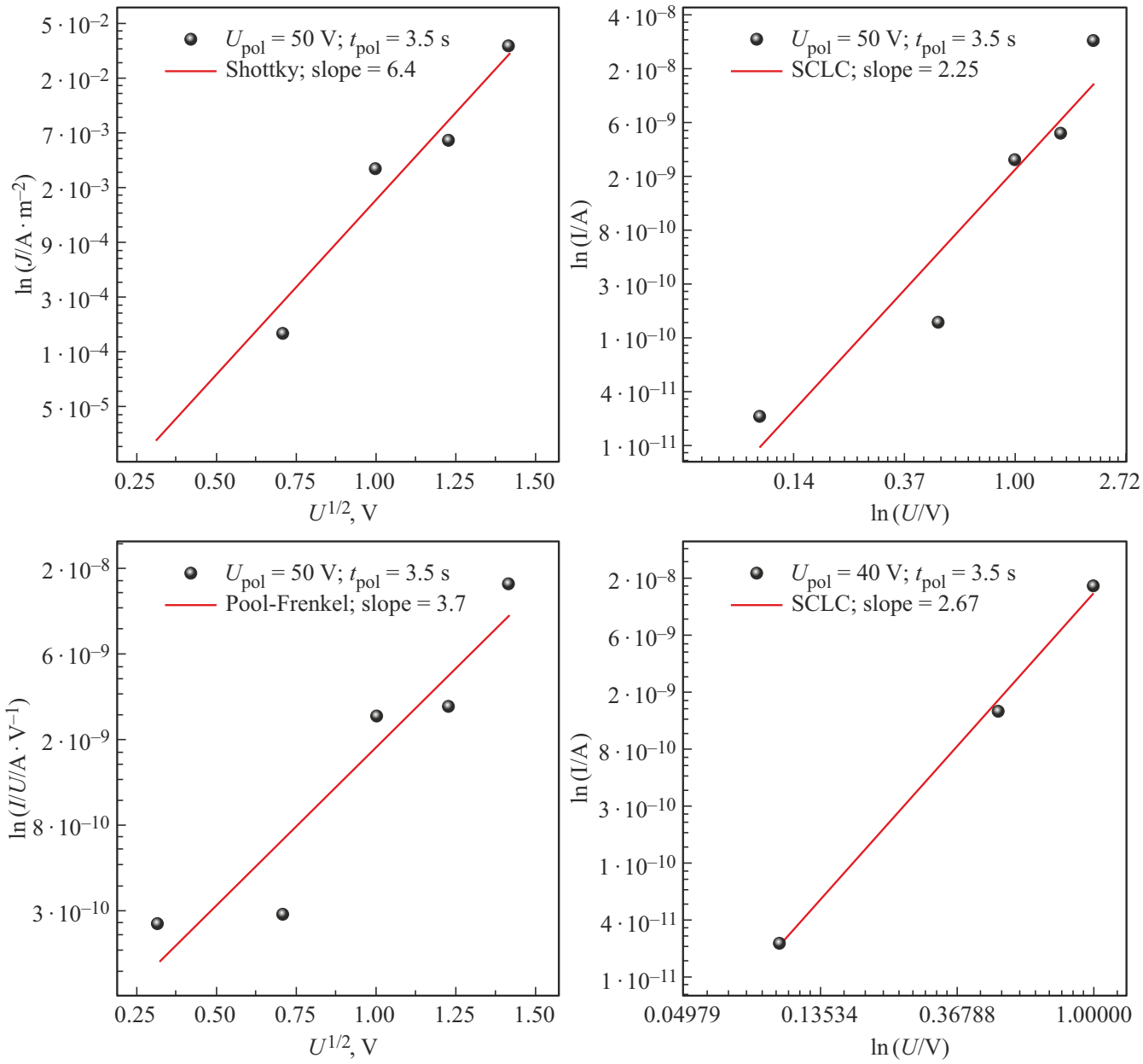


Рис. 8. ВАХ образца в координатах Шоттки, ТОПЗ и Пула–Френкеля при условиях внешнего воздействия, указанных сверху в рамках. Коэффициенты наклона подгоночных прямых приведены возле названий механизма проводимости.

Как видно из таблицы увеличение напряжения предварительного воздействия приводит к возрастанию Nt. С учетом вышеизложенного, особенности ВАХ в виде максимумов на рис. 3 и 4 можно объяснить следующим образом: при малых уровнях инжекции электронов (малые напряжения) по мере захвата их примесными центрами увеличивается число инжектированных носителей тока, участвующих в проводимости (восходящая ветвь максимума); при дальнейшем росте напряжения (высокий уровень инжекции) электроны захватываются на более глубокие уровни (кластер *Vö*) при этом время жизни вновь инжектированных носителей заряда растет поскольку ловушки заняты. В ситуации, когда время жизни инжектированных электронов больше максвелловского времени релаксации у катода возникает пространственный заряд ограничивающий дальнейший ток (нисходящая ветвь максимума ВАХ).

Заключение

Таким образом, проведенный анализ релаксационных токов после сброса предварительного поляризующего напряжения U_{pol} в диапазоне 30–55 V и различных времен его воздействия (0.1–4 sec) показал, что ВАХ структуры $BiFeO_3/TiO_2$(Nt)Ti при малых измерительных напряжениях (0.1–2 V) демонстрируют выраженные

немонотонные особенности в виде максимумов $I(U)$ и N-образных участков. Установлено, что эти особенности обусловлены дрейфом и накоплением кислородных вакансий в прикатодной области в процессе предварительной поляризации, что изменяет локальные условия инжекции и захвата носителей. Анализ зависимостей в координатах Шоттки, Пула–Френкеля и тока, ограниченного пространственным зарядом, показал доминирующее участие механизмов Шоттки и ТОПЗ в формировании проводимости структуры после сброса U_{pol}. Оцененное увеличение концентрации ловушек с ростом величины предваряющего напряжения подтверждает связь между динамикой дефектов и наблюдаемым релаксационным поведением. Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность управления проводимостью и состоянием мемристивной структуры $BiFeO_3/TiO_2(Nt)Ti$ посредством контролируемой электрической предполяризации, что представляет интерес для оптимизации рабочих режимов и повышения надежности оксидных мемристоров.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams. Nature **453**, 80–83 (2008).
[2] J. Borghetti, G.S. Snider, P.J. Kuekes, J.J. Yang, D.R. Stewart, R.S. Williams. Nature **464**, 873–876 (2010).
[3] J. Yang, D.B. Strukov, D.R. Stewart. Nature Nanotechnology **8**, 13–24 (2013).
[4] A.Q. Jiang, C. Wang, K.J. Jin, X.B. Liu, J.F. Scott, C.S. Hwang, T.A. Tang, H.B. Lu, G.Z. Yang. Advanced Materials **23**, 1277–1281 (2011).
[5] Z. Zhao, A. Abdelsamie, R. Guo, S. Shi, J. Zhao, W. Lin, K. Sun, J. Wang, J. Wang, X. Yan, J. Chen. Nano Research **15**, *3*, 2682–2688 (2022).
[6] J. Wu, J. Wang. Journal of Applied Physics **108**, 094102 (2010).
[7] J. Wu, X. Lou, Y. Wang, J. Wang. Electrochemical and Solid-State Letters **13**, G9–G11 (2009).
[8] F. Orudzhev, S. Ramazanov, D. Sobola, A. Isaev, C. Wang, A. Magomedova, M. Kadiev, K. Kaviyarasu. Nanomaterials **10**, 2183 (2020).
[9] S. Ramazanov, F. Orudzhev, G. Gajiev, V. Holcman, R.S. Matos, H.D. da Fonseca Filho, S. Tălu, D. Selimov. Applied Surface Science **158863** (2023).
[10] M.-T. Chentir, E. Bouyssou, L. Ventura, C. Anceau. Journal of Applied Physics **105**, 061605 (2009).
[11] A.Q. Jiang, C. Wang, K.J. Jin, X.B. Liu, J.F. Scott, C.S. Hwang, T.A. Tang, H.B. Lu, G.Z. Yang. Advanced Materials **23**, 1277–1281 (2011).
[12] Y. Podgorny, K. Vorotilov, A. Sigov. AIP Advances **6**, 095025 (2016).
[13] Yu.V. Podgorny, A.N. Antonovich, K.A. Vorotilov, A.S. Sigov. Ferroelectrics **544**, 82–87 (2019).
[14] S. Lancaster, P.D. Lomenzo, M. Engl, B. Xu, T. Mikolajick, U. Schroeder, S. Slesazeck. Frontiers in Nanotechnology **4**, 939822 (2022).
[15] H. Zhu, Y. Yang, X. Meng, A. Jiang, Z. Bai, X. Zheng, L. Jin, C. Wang, S. Feng. Applied Physics Letters **112**, 182904 (2018).
[16] Y. Yang, H. Zhu, D. Chu, K. Liu, Y. Zhang, M. Pei, S. Feng, L. Jin, C. Wang, J. Liu, R. Li, S. Wang. Journal of Physics D: Applied Physics **53**, 115301 (2020).
[17] Г.М. Гаджиев, Ш.М. Рамазанов, Н.С. Абакарова, Т.Н. Эфендиева. ФТТ **66** (2), 259–265 (2024).
[18] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников, Наука, М. (1977).
[19] F.-C. Chiu. Advances in Materials Science and Engineering **2014**, 578168 (2014).

Редактор Т.Н. Василевская