

Д. ф.-м. н. А. С. ТОНКОШКУР, к. ф.-м. н. А. В. ИВАНЧЕНКО

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара
E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

КИНЕТИКА ДЕФОРМАЦИИ ВАХ ОКСИДНЫХ ВАРИСТОРНЫХ СТРУКТУР, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ПЕРЕЗАРЯДКОЙ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ

Проведено моделирование деформации импульсных вольт-амперных характеристик (ВАХ) отдельного межкристаллитного потенциального барьера при переходных процессах поляризации/деполяризации, связанной с перезарядкой поверхностных электронных состояний, которые обуславливают этот барьер. Установлено, что в зависимости от концентрации и степени заполнения этих поверхностных состояний электронами воздействие постоянного напряжения может привести к смещению импульсных ВАХ в область больших или же малых токов. Показана возможность применения найденных закономерностей для керамических варисторных структур. Предложенная модель позволяет интерпретировать наблюдаемые при испытаниях варисторов на ускоренное старение «аномальные» эффекты, такие как возрастание классификационного напряжения и уменьшение мощности активных потерь.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, поверхностные электронные состояния, варистор, деградация, поляризация, деполяризация, уход напряжения, релаксация, межкристаллитный барьер.

Длительное воздействие электрической нагрузки на оксидно-цинковые варисторы приводит к деформации их вольт-амперных характеристик (ВАХ), которую связывают с изменением высоты и ширины межкристаллитных барьеров, являющихся основным их структурным рабочим элементом. Указанный процесс может быть вызван миграцией ионов висмута, кобальта [1] или цинка [2] к границе кристаллитов (зерен ZnO) при протекании тока, десорбцией кислорода [3, 4], изменением заполнения глубочайших поверхностных электронных состояний (ПЭС) на границах кристаллитов ZnO [5–7].

Наиболее известные механизмы, связанные с миграцией ионов и десорбцией кислорода, проанализированы в рамках электромиграционной [8, 9] и термодесорбционной [10] моделей деградации. Эти механизмы приводят к уменьшению классификационного напряжения и увеличению тока (или активной мощности рассеяния) в диапазоне предваристорного участка ВАХ в процессе электрической деградации. Тем не менее, в некоторых случаях при производственных испытаниях варисторов на стабильность имеют место аномальные эффекты, которые не могут быть объяснены в рамках указанных моделей. В частности, для отдельных видов керамики при испытаниях на «ускоренное старение» наблюдается увеличение электрического сопротивления [11] и уменьшение активной мощности рассеяния [12]. Возможность интерпретации этих аномалий в рамках представлений о перезарядке локализованных электронных состояний не выяснена, несмотря на то, что такие переходные

поляризационные явления оказывают влияние на формирование электрических свойств варисторных структур, в частности обуславливают деформацию их ВАХ. Также нет детальных исследований и моделей, учитывающих это в процессах деградации варисторов.

Следует отметить, что исследованиям поляризационных явлений в оксидно-цинковой керамике посвящен ряд работ [13–15]. Однако их направленность ограничивается в основном изучением физики механизмов этих процессов и определением параметров участвующих в них локализованных электронных состояний. Данные об изучении изменений ВАХ и их параметров (коэффициента нелинейности, токов утечки и классификационного напряжения), важные, прежде всего, для обоснования конкретных методов контроля, в литературе отсутствуют. Одним из перспективных средств анализа комплекса проявлений поляризационных процессов в рассматриваемых объектах может быть исследование поведения импульсных ВАХ, при измерении которых можно пренебречь изменением температуры и заполнения образующих межкристаллитные барьеры поверхностных локализованных состояний.

Целью настоящей работы было проведение моделирования деформации импульсных ВАХ отдельного межкристаллитного потенциального барьера в переходных процессах зарядовой поляризации/деполяризации и экспериментальных исследований смещений классификационного напряжения высоковольтных варисторных керамических структур в процессе деградации их характеристик при постоянном токе.

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДЕФОРМАЦИИ ВАХ**

**Базовые уравнения
поляризации/деполяризации**

Основная цель теоретической модели — установить связь между импульсными полевыми зависимостями электропроводности, т. е. зависимостями, определенными при фиксированных зарядах на ПЭС, и параметрами самих локализованных состояний.

Керамика, предназначенная для оксидно-цинковых варисторов, состоит из сильно легированных полупроводниковых (*n*-типа проводимости) кристаллических зерен ZnO и небольшого количества межкристаллитной фазы. Электрические свойства варисторной керамики контролируются межкристаллитными потенциальными (МП) барьерами. Эти барьеры образованы истощенными приповерхностными областями пространственного заряда (ОПЗ) двух соседних зерен ZnO и тонким слоем (2 нм) диэлектрической межкристаллитной (МК) фазы между ними [16].

Глубокие локализованные состояния на границе «полупроводник — диэлектрик» являются причиной изгиба энергетических зон в приповерхностных областях полупроводниковых кристаллитов. В постоянном электрическом поле изгиб зон на одной стороне границы кристаллита уменьшается, а на другой увеличивается. Это приводит к поляризации образца за счет дополнительного захвата и потери заряда (электронов) поверхностными и объемными локализованными состояниями, которые энергетически расположены вблизи уровня Ферми, а пространственно — на обеих сторонах тонкого диэлектрического межкристаллитного слоя. Перезарядка локализованных состояний происходит преимущественно за счет электронных переходов между локализованными состояниями и зоной проводимости кристаллитов ZnO. После того как электрическое поле уменьшается до нуля, начинается деполяризация образца. При возвращении образца в исходное состояние происходят обратные изменения в заполнении локализованных состояний.

Для того чтобы при анализе кинетики деформации ВАХ оксидных варисторных структур учитывать только ПЭС, следует принять во внимание следующее.

Во-первых, причиной переходных поляризационных/деполяризационных явлений в исследуемых структурах является наличие в кристаллитах ZnO перезаряжающихся объемных и поверхностных локализованных электронных состояний [16, 17]. При этом перезарядка объемных локализованных состояний доминирует при малых поляризующих напряжениях (не выходящих за пределы предваристорного участка ВАХ). При высокой температуре и сильном электрическом поле (в том числе и им-

пульсном) переходной процесс определяют более «медленные» электронные состояния — поверхностные [18, 19].

Во-вторых, изменение рельефа МП-барьера вызывает только зарядка и разрядка глубоких ПЭС, что в итоге отражается на форме импульсных ВАХ образцов, поскольку во время их измерения распределение заряда на локализованных состояниях практически не успевает измениться.

Построение модели деформации ВАХ основано на определении кинетики функций заполнения ПЭС электронами в кристаллите при его зарядке (поляризации) и разрядке (деполяризации) и исследовании изменений импульсных ВАХ (или их параметров) в зависимости от значений этих функций.

Кинетика перезарядки локализованных состояний

При анализе электрических переходных процессов в варисторах в качестве их элемента использовали одномерную дипольную варисторную ячейку — полупроводниковый слой оксида цинка (толщиной около 10 мкм), заключенный между описанными выше МП-барьерами.

Изменение во времени (*t*) заряда ПЭС (для простоты принят один тип состояний) на границах кристаллита размером *2a* с центром координат в его середине: $\Delta Q(\pm a, t) = -e \cdot N(f(\pm a, t) - f(\pm a, 0))$ при приложении и снятии электрического напряжения к варисторной структуре определяется путем решения соответствующих кинетических уравнений для неравновесной функции заполнения ПЭС электронами $f(\pm a, t)$ в рамках статистики Шокли — Рида — Холла [20]:

$$\frac{df(\pm a, t)}{dt} = c_S^- ([1 - f(\pm a, t)] \cdot n(\pm a, t) - f(\pm a, t) \cdot N^-), \quad (1)$$

где c_S^- — коэффициент захвата электронов поверхностным уровнем;

$n(\pm a, t)$ — распределение концентрации свободных электронов на границах полупроводниковых кристаллитов;

N^- — приведенная эффективная концентрация электронов в зоне проводимости для данного ПЭС.

При этом

$$n(\pm a, t) = n_0^- \exp(Y(\pm a, t));$$

$$N^- = N_C \exp(-\Delta E_S / (k_B T)),$$

где n_0^- — объемная концентрация свободных электронов в полупроводниковых кристаллитах, $n_0^- = N_C \exp(-\Delta E_{CF} / (k_B T))$;

$Y(\pm a, t)$ — безразмерные изгибы энергетических зон в ОПЗ полупроводникового кристаллита, $Y(\pm a, t) = e(\varphi(\pm a, t) - \varphi_0) / (k_B T)$;

N_C — эффективная плотность состояний в зоне проводимости;

ΔE_S — энергия ионизации ПЭС;

k_B — постоянная Больцмана;

T — температура;

ΔE_{CF} — энергетическое расстояние между уровнем Ферми и дном зоны проводимости;

$\varphi(\pm a, t)$ – электрический потенциал;
 e – заряд электрона;
 Φ_0 – потенциал в объеме полупроводника.

При решении уравнения (1) используются следующие начальные условия:

– при приложении электрического напряжения (поляризации)

$$f(\pm a, 0) = f_{SF}; \quad (2)$$

– при снятии электрического напряжения (деполяризации)

$$f(\pm a, 0) = f_{pol}(\pm a, t_{pol}). \quad (3)$$

Здесь f_{SF} – функция Ферми, определяющая заполнение ПЭС в равновесных условиях, $f_{SF} = [1 + \exp(\Delta E_S / (k_B T) - Y_{S0})]^{-1}$; Y_{S0} – равновесное значение $Y(\pm a, t)$ (до перезарядки ПЭС); $f_{pol}(\pm a, t_{pol})$ – значение функции заполнения ПЭС электронами в момент окончания действия поляризующего напряжения (t_{pol}).

Распределение потенциала

Для нахождения распределения потенциала на поверхности раздела полупроводников «ZnO – диэлектрическая МК-фаза» при поляризации ($Y_{pol}(\pm a, t)$) и деполяризации ($Y(\pm a, t)$) использовались условия непрерывности электрической индукции на границах «изолятор – полупроводник» [18]

$$\epsilon_0 \epsilon_d \frac{V_3(t)}{d_d} = \epsilon_0 \epsilon_s \frac{d\varphi(x, t)}{dx} \Big|_{x=-a} + eN_s f(-a, t); \quad (4)$$

$$\epsilon_0 \epsilon_s \frac{d\varphi(x, t)}{dx} \Big|_{x=a} = \epsilon_0 \epsilon_d \frac{V_3(t)}{d_d} + eN_s f(a, t), \quad (5)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная;
 ϵ_d, ϵ_s – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника и МК-фазы, соответственно;
 V_3 – падение напряжения V_b , приложенного к дипольной ячейке варисторной структуры, на прослойке МК-фазы, $V_3 = V_b - \varphi(a) + \varphi(-a)$;
 d_d – толщина диэлектрической прослойки МК-фазы;
 N_s – концентрация ПЭС;
 $d\varphi/dx = k_B T / (eL) \cdot F(Y, n_i/n_0^-)$;
 $L = [\epsilon_0 \epsilon_s k_B T / (e^2 n_0^-)]^{0,5}$ – длина экранирования;
 n_i – концентрация свободных носителей заряда в собственном полупроводнике.

При этом $F(Y, n_i/n_0^-)$ – первый интеграл уравнения Пуассона в теории области пространственного заряда для полупроводников с полностью ионизированными объемными примесями:

$$F(Y, n_i/n_0^-) = \text{sign}(-Y) \cdot \{(n_i/n_0^-)^2 [\exp(-Y) + Y - 1] + \exp(Y) - Y - 1\}^{0,5} \quad [20].$$

Система уравнений (1), (4) и (5) определяет кинетику перезарядки ПЭС (функция $f(\pm a, t)$) для процесса поляризации равновесной варисторной структуры при использовании начального условия (2) и процесса деполяризации поляризованной варисторной структуры при использовании начального условия (3).

К расчету импульсных ВАХ структур ZnO

При расчете и анализе импульсных ВАХ оксидно-цинковых варисторных структур использована модель одномерного «микроваристора», который представляет собой последовательное соединение объемной части кристаллита и единичного МП-барьера, образованного прослойкой МК-фазы с примыкающими к ней обедненными ОПЗ соседних кристаллитов [16]. При расчете ВАХ использована расчетная схема [21], в которой в качестве наиболее вероятных механизмов электропереноса через МП-барьер приняты следующие [16, 22]:

- термоэлектронная эмиссия с туннелированием через прослойку МК-фазы;
- туннелирование между зонами проводимости соседних кристаллитов через ОПЗ и прослойку;
- переходы электронов с поверхности одного кристаллита через расположенные в приграничной области прослойки «медленные» ПЭС с последующим туннелированием;
- полевая эмиссия из валентной зоны одного кристаллита в зону проводимости другого.

Деформация импульсных ВАХ

Решение системы уравнений (1), (4) и (5) для определения кинетики изменения поверхностного заряда представляет собой сложную математическую задачу, которая может быть решена численными методами последовательных приближений [18]. В зависимости от конкретной ситуации эта задача может быть упрощена. В рамках используемой модели можно сделать упрощения, которые следуют из структуры и электрических свойств варисторной керамики.

Первое упрощение базируется на том, что после того как прекращается полевое воздействие на варисторную структуру, на ПЭС одной из сторон кристаллита ZnO всегда остается отрицательный заряд, и по причине очень малой (нанометровой) толщины диэлектрической прослойки МК-фазы влияние этого заряда распространяется на приповерхностную область соседнего кристаллита. Таким образом, истощающий изгиб зон присутствует всегда.

Второе упрощение основано на анализе [17], где показано, что переходные процессы определяются зависящими от времени параметрами, которые характеризуются постоянной времени релаксации.

Влияние величины постоянного поляризующего напряжения

Исследования проводились с помощью импульсных ВАХ МП-барьеров в поляризованном состоянии после воздействия постоянного напряжения V_{dc} в течение времени t_{dc} (время зарядки).

Для получения ВАХ сначала при заданном V_{dc} из условий непрерывности потенциала и электрической индукции (4), (5) и неравновес-

ных функций заполнения ПЭС электронами проводился расчет стационарных функций заполнения ПЭС электронами $f(\pm a, t_{dc}^*)$. Для этого была использована формула, полученная решением (1) с начальным условием (2) при выше сформулированных приближениях:

$$f(\pm a, t_{dc}) = f(\pm a, t_{dc}^*) + [f_{SF} - f(\pm a, t_{dc}^*)] \cdot \exp\left(-\int_0^{t_{dc}} \frac{dt'}{\bar{\tau}}\right), \quad (6)$$

где $\bar{\tau}(\pm a) = (c_s^- \cdot [\bar{n}(\pm a) + N^-])^{-1}$;

$$\bar{n}(\pm a) \approx 0,5[n(\pm a, 0) + n(\pm a, t_{dc}^*)];$$

t_{dc}^* – время, достаточное для полного установления поляризации (предельной зарядки);

t' – переменная интегрирования по времени.

Неравновесные изгибы зон $Y(\pm a, t_{dc})$ находили из условий непрерывности (4), (5) при $V_{dc} = 0$. Затем при значениях функций $f(\pm a, t_{dc})$, определяемых из (6), находили плотность тока $j_p(V_p, t_{dc})$, протекающего при измерении ВАХ через МП-барьер при приложении к нему напряжения V_p .

На рис. 1 представлены импульсные ВАХ отдельного «микроваристора» до и после воздействия постоянного напряжения V_{dc} (соответствующего $j_{dc} = 0,1 \text{ mA/cm}^2$) в течение времени t_{dc}^* . При расчетах были приняты типичные для кристаллитов ZnO значения концентрации свободных электронов $n_0^- = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ и энергии ионизации ПЭС $\Delta E_S = 0,8 \text{ эВ}$. Как видно из рисунка, ВАХ существенно изменяются в предваристорной области. Интенсивность и знак этих изменений зависят от концентрации ПЭС и степени их заполнения в исходном равновесном (неполяризованном) состоянии: при малой концентрации ($N_S = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) ВАХ смещается вверх, в область

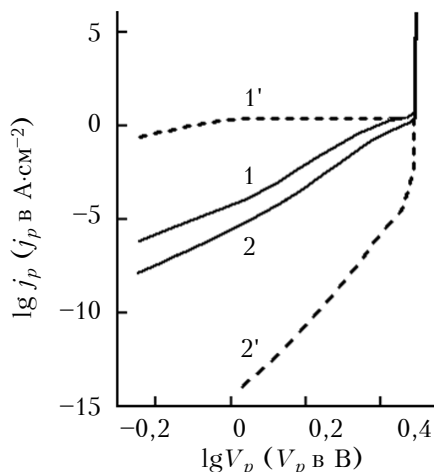


Рис. 1. Расчетные импульсные ВАХ элементов одномерных варисторных структур в исходном состоянии (1, 2) и после предельной зарядки (1', 2') при различных значениях концентрации ПЭС:

1, 1' – 10^{12} cm^{-2} ; 2, 2' – 10^{13} cm^{-2}

больших токов, если же концентрация близка к предельной (10^{13} cm^{-2}) [23], то наоборот.

Отметим, что на рис. 1 приведены ВАХ, полученные при одинаковой полярности постоянного (j_{dc}) и импульсного (j_p) токов. При противоположной полярности их поведение аналогичное с некоторыми отличиями абсолютных величин.

Интерпретация полученных результатов может быть дана на основе представлений о формировании МП-барьера зарядом, захваченным ПЭС [16, 21]. В зависимости от концентрации ПЭС и степени их заполнения электронами формируется высота и ширина МП-барьера. При $N_S = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ПЭС практически полностью заполнены электронами ($f(\pm a, 0) \approx 0$), и воздействие напряжения V_{dc} может привести только к уменьшению степени их заполнения в ОПЗ, смещенной в обратном направлении. В результате общий заряд на ПЭС уменьшается, что приводит к снижению высоты МП-барьера и смещению импульсных ВАХ вверх (рис. 1, кривые 1 и 1'). При $N_S = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ наоборот: ПЭС практически пусты ($f_{Si}(0) \approx 0$), поэтому приложении напряжения приводит к заполнению их электронами в ОПЗ, смещенной в прямом направлении. Таким образом, высота МП-барьера увеличивается, а импульсные ВАХ смещаются вниз (рис. 1, кривые 2 и 2').

На рис. 2 и 3 представлены зависимости таких характеристик импульсных ВАХ, как «уход» напряжения $\delta V_p^* = (V_p^* - V_p) / V_p$ и изменение плотности тока j_p^* / j_p после предельной зарядки от величины приложенного напряжения V_{dc} (V_p^*, j_p^* – значения импульсного напряжения и плотности тока через микроваристор после предельной зарядки).

На рис. 2 видно, что с ростом напряжения поляризации V_{dc} уход напряжения при фиксированной плотности тока через МП-барьер может быть как отрицательным, так и положительным, в зависимости от концентрации ПЭС. Данные

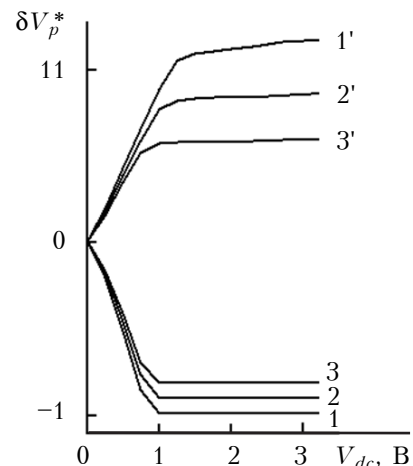


Рис. 2. Зависимость ухода напряжения от поляризующего напряжения V_{dc} , измеренная сразу после предельной зарядки при различных значениях плотности тока j_p (в A/cm^2):

1, 1' – 10^{-4} ; 2, 2' – 10^{-3} ; 3, 3' – 10^{-2}
(1, 2, 3 – $N_S = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$; 1', 2', 3' – $N_S = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)

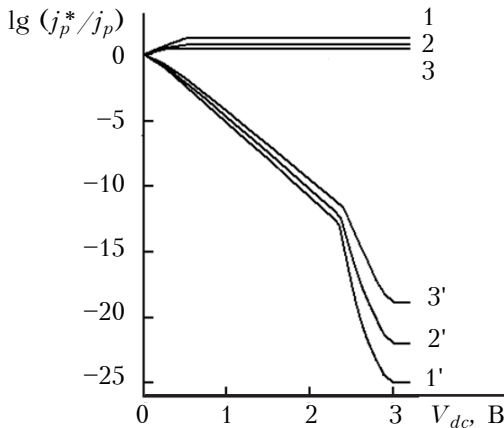


Рис. 3. Зависимость изменения импульсного тока от поляризующего напряжения V_{dc} , измеренная сразу после предельной зарядки при различных значениях напряжения V_p (в В): 1, 1' – 2,0; 2, 2' – 2,2; 3, 3' – 2,4 ($1, 2, 3 - N_S = 10^{12} \text{ см}^{-2}$; 1', 2', 3' – $N_S = 10^{13} \text{ см}^{-2}$)

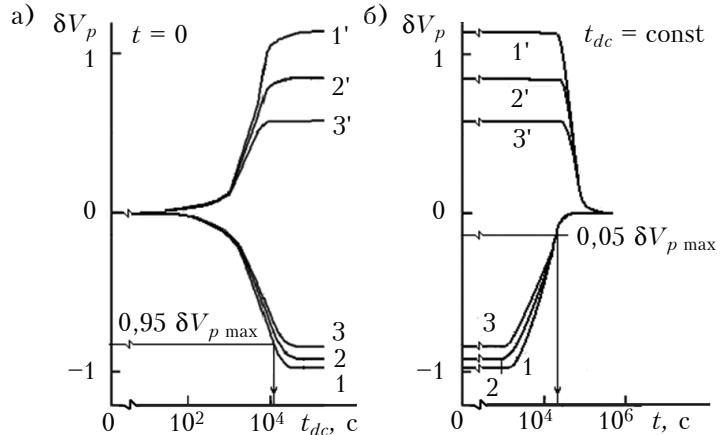


Рис. 4. Зависимости ухода напряжения от времени зарядки t_{dc} (а) и от времени релаксации t (б) после снятия поляризующего напряжения $V_{dc} = 2,56 \text{ В}$, полученные при различных значениях плотности тока j_p (в $\text{А}/\text{см}^2$): 1, 1' – 10^{-4} ; 2, 2' – 10^{-3} ; 3, 3' – 10^{-2} ($1, 2, 3 - N_S = 10^{12} \text{ см}^{-2}$; 1', 2', 3' – $N_S = 10^{13} \text{ см}^{-2}$)

рис. 3 показывают, что при фиксированном значении импульсного напряжения плотность тока также может уменьшаться или увеличиваться с ростом V_{dc} , а значит, поляризационная деформация может привести к соответствующим изменениям рассеиваемой на МП-барьере электрической мощности.

Следует отметить, что с ростом V_{dc} указанные параметры ВАХ изменяются лишь до некоторых предельных значений, которые соответствуют полной зарядке ПЭС в прямосмещенной ОПЗ и полной разрядке в обратносмещенной ОПЗ кристаллитов. По мере приближения к варисторному участку импульсной ВАХ (увеличение j_p или V_p) амплитуда ухода напряжения или изменений тока становится меньше.

Переходные изменения

При нахождении зависимостей величины ухода напряжения сразу после снятия постоянного поляризующего напряжения (т. е. при времени релаксации $t = 0$) от времени зарядки использовался описанный выше алгоритм расчета импульсных ВАХ.

Как видно из рис. 4, а, с ростом времени t_{dc} абсолютное значение ухода напряжения $\delta V_p(t_{dc}) = [V_p(t_{dc}) - V_p(0)] / V_p(0)$ возрастает, насыщаясь при больших t_{dc} . При этом, если принять коэффициент захвата электронов ПЭС c_S^- равным $10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$, время t_{dc}^* , в течение которого абсолютная величина ухода достигает значений $\delta V_p(t_{dc}^*) = 0,95 [V_{p \text{ max}} - V_p(0)] / V_p(0)$, будет составлять $3 \cdot 10^4 \text{ с}$. Это значение соответствует величине $\bar{\tau}(\pm a)$, которая получается по формуле, приведенной в экспликации к выражению (6).

Для анализа релаксации импульсных ВАХ МП-барьера после снятия поляризующего напряжения производился расчет исходных зна-

чений функции заполнения электронами ПЭС $f(\pm a, t_{dc})$ при заданных V_{dc} и t_{dc} из условий непрерывности потенциала и индукции (4), (5) и выражения (6). Неравновесные функции $f(\pm a, t)$ определялись путем решения уравнения (1) с начальными условиями (3), соответствующими процессу деполяризации:

$$f(\pm a, t) \approx f_{SF} + (f(\pm a, t_{dc}) - f_{SF}) \cdot \exp\left(-\int_0^t \frac{dt'}{\bar{\tau}}\right), \quad (7)$$

где $\bar{\tau}$ определяется так же, как и в формуле (6).

Расчет неравновесных изгибов зон $Y(\pm a, t)$ из условий непрерывности (4), (5) и импульсных ВАХ при $V_{dc} = 0$ и значениях функции $f(\pm a, t)$, определяемых по формуле (7), производился аналогично описанному ранее алгоритму.

На рис. 4, б представлены кинетические релаксационные зависимости ухода напряжения $\delta V_p(t) = [V_p(t) - V_p(0)] / V_p(0)$ импульсных ВАХ. Время релаксации t^* , в течение которого абсолютная величина ухода напряжения равна $\delta V_p(t^*) = 0,05 [V_{p \text{ max}} - V_p(0)] / V_p(0)$, составляет более 10^4 с .

Наблюдаемые на рис. 4 особенности кинетики можно интерпретировать, принимая во внимание наличие двух отличающихся по величине постоянных времени $\bar{\tau}(\pm a) \sim [\bar{n}(\pm a) + N^-]^{-1}$. Если энергетически ПЭС расположены ниже уровня Ферми, то $\bar{n}(\pm a) \ll N^-$, а если выше, то $\bar{n}(\pm a) \gg N^-$. Участвующий в перезарядке уровень ПЭС, расположенный выше уровня Ферми, разряжается, а его постоянная меньше, чем в случае когда он расположен ниже уровня Ферми и заряжается. Таким образом, процесс разряда ПЭС более медленный, чем процесс заряда. Это соответствует более медленным про-

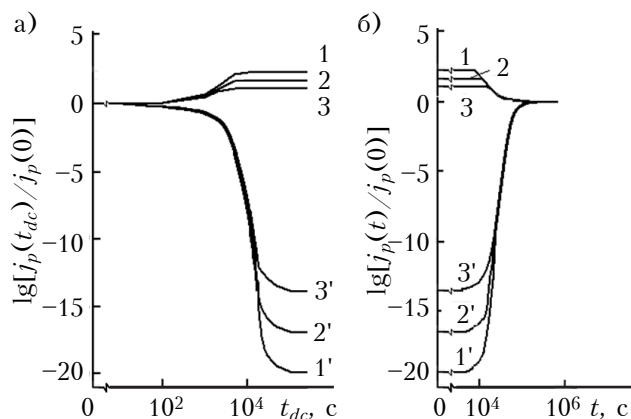


Рис. 5. Зависимости изменения плотности тока от времени зарядки t_{dc} (a) и от времени релаксации t (б) после снятия поляризующего напряжения $V_{dc} = 2,56$ В, полученные при различных значениях напряжения V_p (в В):
 1, 1' – 2,0; 2, 2' – 2,2; 3, 3' – 2,4
 (1, 2, 3 – $N_S = 10^{12}$ см $^{-2}$; 1', 2', 3' – $N_S = 10^{13}$ см $^{-2}$)

цессам поляризации и более быстрым процессам деполяризации структуры с малой концентрацией ПЭС (когда в равновесии они полностью заполнены электронами). Для структуры с большой концентрацией ПЭС ($N_S = 10^{13}$ см $^{-2}$), где в равновесии ПЭС слабо заряжены, наблюдается обратный эффект.

Аналогичные кинетические зависимости импульсного тока представлены на рис. 5.

Следует отметить, что параметры t^* и t_{dc}^* , определяемые максимальной величиной $\bar{\tau}(\pm a)$, слабо изменяются в исследованных диапазонах значений поляризующего тока j_{dc} и напряжения V_{dc} (рис. 4 и 5).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При проведении экспериментальных исследований основное внимание уделялось изменениям наиболее контролируемого в производственных условиях функционального параметра варисторов – классификационного напряжения [24]. Это напряжение измеряют при кратковременном (1–2 с) пропуске электрического тока величиной 1 мА и обозначают $V_{1.0}$. Поскольку варисторы имеют разные геометрические размеры, при исследованиях варисторной керамики для определения $V_{1.0}$ пользуются плотностью тока, которая для рассматриваемых высоковольтных варисторов составляет порядка 10^{-4} А/см 2 [9].

Образцы и методика исследований

Для экспериментального изучения импульсных ВАХ были использованы образцы коммерческой оксидно-цинковой керамики для варисторов высокого напряжения двух составов: ZnO – Bi $_2$ O $_3$ – Co $_2$ O $_3$ – Sb $_2$ O $_3$ – MnO $_2$ – Cr $_2$ O $_3$ (I) и ZnO – Bi $_2$ O $_3$ – CoO – Sb $_2$ O $_3$ – SnO $_2$ – MnO – V $_2$ O $_5$ (II). Образцы получены в промышленных

условиях путем жидкофазного спекания (из-за присутствия оксида висмута и других оксидов с низкой температурой плавления) и имеют соответственно серебряные (I) и алюминиевые (II) электроды.

Микроструктура керамики обоих составов – типичная и описана во многих исследованиях [16, 25–27]. Исследования методами сканирующей электронной микроскопии показывают, что исследуемые материалы содержат зерна оксида цинка размером примерно 5 мкм и включения оксидных межкристаллитных фаз (в частности, Bi – Sb – Zn – O-фаза). Пористость обоих материалов достаточно низкая, а плотность относительно высокая (около 5,54 г/см 3).

При экспериментальных исследованиях использовалась аппаратура для измерения ВАХ, аналогичная описанной в [28]. Перед каждой поляризацией образца его электроды накоротко замыкали на 30 мин, чтобы обеспечить восстановление исходного заряда ПЭС после предыдущего заряда/разряда. Затем образец подвергли воздействию постоянного электрического тока в течение заданного времени и после отключения тока измеряли ВАХ. Время измерения ВАХ было во много раз меньше времени зарядки образца и составляло не более 2 мин. Измерения ВАХ повторяли после последовательного увеличения абсолютной величины деградационного постоянного тока или времени его пропуска либо через определенные промежутки времени после его выключения.

Результаты и их анализ

Экспериментально полученные зависимости ухода классификационного напряжения $\delta V_{1.0}$ от времени проведения «ускоренного старения» для исследованных образцов варисторной керамики представлены на рис. 6 (кривые получены при одинаковой полярности при измерении классификационного напряжения и напряжения при протекании тока j_{dc}). Температура процесса «старения» составляла 353 К, температура измерения ВАХ – 300 К. Как видно, для керамики состава II, стабилизированной добавкой V $_2$ O $_5$, с ростом времени пропуска деградационного постоянного электрического тока наблюдается

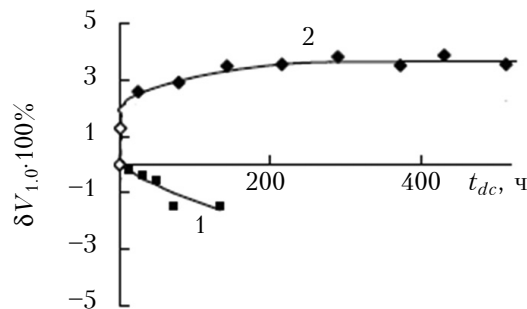


Рис. 6. Зависимости $\delta V_{1.0}$ от времени проведения ускоренного старения для образцов керамики составов I (1) ($j_{dc} = 0,1$ мА/см 2) и II (2) ($j_{dc} = 0,4$ мА/см 2)

ся увеличение напряжения $V_{1,0}$, а для керамики I — его уменьшение.

Приведенные на рис. 6 данные соответствуют теоретическим закономерностям, полученным в рамках разработанной модели деформации ВАХ оксидных варисторных структур, которая обусловлена перезарядкой локализованных состояний.

Следует отметить, что в рамках приведенных представлений могут быть интерпретированы и данные, полученные в [11], где говорилось о противоположных тенденциях в изменениях плотности тока после приложения поляризационного напряжения V_{dc} в течение времени t_{dc} к образцам керамики разных составов. Эти измерения проводились для случая $V_p = V_{dc}$. Данные из [11], представленные на рис. 7 в принятых в настоящей работе координатах — $j_p(t_{dc})/j_p(0)$ и t_{dc} , также согласуются с приведенными теоретическими результатами.

Отметим, что экспериментально наблюдаемые диапазоны изменений параметров $\delta V_{1,0}$ и $j_p(t_{dc})/j_p(0)$ для исследованных керамических структур значительно меньше, чем теоретически рассчитанные для отдельного микроваристора. Это может быть связано с неупорядоченностью керамической структуры и реализацией в процессе ускоренного старения целого ряда других механизмов деградации — миграции ионов, термодесорбции молекул поверхностного кислорода и пр. В зависимости от химического состава и технологических особенностей изготовления керамики доминирующим механизмом может выступить любой из них.

Следует также отметить, что проявление аномального изменения параметров (увеличение $\delta V_{1,0}$ и уменьшение $j_p(t_{dc})/j_p(0)$) связано с таким параметром ПЭС, как коэффициент захвата c_s^- им электронов из зоны проводимости кристаллита. Поскольку $c_s^- = \sigma_s^- \bar{v}_T$, где σ_s^- и \bar{v}_T — сечение захвата ПЭС и средняя тепловая

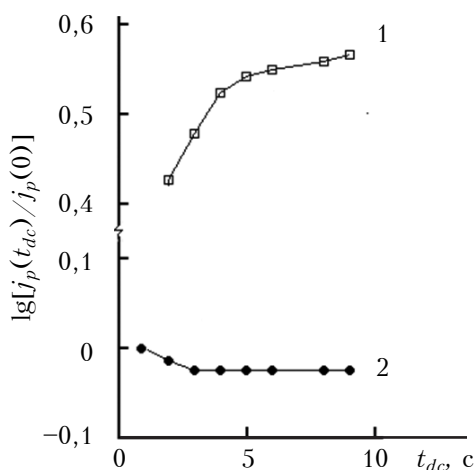


Рис. 7. Зависимость относительного изменения тока через варистор от времени его протекания для образцов керамики составов ZnO—Sb₂O₃—Bi₂O₃—Co₃O₄—MnO₂—Cr₂O₃ (1) и ZnO—Bi₂O₃—Co₃O₄—MnO₂—V₂O₃—Sb₂O₃—ZrO₂ (2)

скорость свободных электронов, величина c_s^- отражает природу ПЭС. Типичные значения σ_s^- изменяются в широких пределах — от 10^{-15} см² (нейтральные состояния) до 10^{-19} (кулоновские отталкивающие состояния) [29]. Учитывая, что $\bar{\tau}(\pm a) = (\sigma_s^- \bar{v}_T N^-)^{-1}$, получим диапазон возможных значений $\bar{\tau}(\pm a)$: от 0,5 до 10^4 ч. Таким образом, даже в случае больших концентраций ПЭС и более быстрых изменений исследованных параметров $\delta V_{1,0}$ и $j_p(t_{dc})/j_p(0)$, наблюдаемых в описанном в [19, 30] эксперименте, доминирующими могут выступать другие механизмы деградации, не приводящие к аномальным эффектам.

Введение в керамику добавки оксида бора, по-видимому, приводит к образованию ПЭС, сильно отталкивающих электроны, и обуславливает меньшие их сечения захвата и большее время перезарядки, что и позволяет наблюдать аномальный рост классификационного напряжения и электрического сопротивления в процессе проведения деградации с помощью постоянного электрического тока.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили проанализировать кинетику деформации импульсных ВАХ, которая обусловлена перезарядкой локализованных состояний, и определить, что воздействие поляризующего напряжения может привести к смещению ВАХ в область больших или малых токов в зависимости от концентрации и степени заполнения ПЭС. Время перезарядки ПЭС, связанное с их природными особенностями, может изменяться в широких пределах — от получаса до нескольких тысяч часов. По мере приближения к варисторному участку импульсной ВАХ амплитуда ухода напряжения при фиксированном токе или величина изменения плотности тока при фиксированном напряжении уменьшаются. Анализ полученных результатов позволяет предположить, что для варисторной керамики, содержащей добавку оксида бора, ПЭС, формирующие межкристаллитные потенциальные барьеры, имеют аномально малые сечения захвата электронов, характерные для отталкивающих центров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Chiang Y. M., Kingery W. D., Levinson L. M. Compositional changes adjacent to grain boundaries during electrical degradation of a ZnO varistor // Journal of Applied Physics. — 1982. — Vol. 55, iss. 3. — P. 1765—1768. DOI: 10.1063/1.331647
2. Gupta T. K., Carlson W. G. A grain-boundary defect model for instability/stability of a ZnO varistor // Journal of Materials Science. — 1985. — Vol. 20, iss. 10. — P. 3487—3500. DOI: 10.1007/BF01113755
3. Макаров В. О., Тонкошкур А. С., Черненко И. М. Влияние термовакуумной обработки на электрические свойства оксидно-цинковых варисторов // Электронная техника. Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. — 1988. — Вып. 1(70). — С. 18—20.
4. Kostić P., Milosević O., Uskoković D., Ristić M. M. Potential barrier degradation at the grain boundary of ZnO-based nonlinear resistors // Physica B+C. — 1988. — Vol. 150, iss. 1-2. — P. 175—178. DOI: 10.1016/0378-4363(88)90120-9

5. Авдеенко Б. К., Тонкошкур А. С., Черненко И. М., Ивон А. И., Щелоков А. И. Температурный коэффициент сопротивления высоколинейных оксидно-цинковых резисторов // Электронная техника. Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. — 1980. — Вып. 4(41). — С. 17–19.
6. Iga A. Drift phenomena of capacitance and current in nonohmic ZnO ceramics // Japanese Journal of Applied Physics. — 1980. — Vol. 19, N 1. — P. 201–202. DOI: 10.1143/JJAP.19.201
7. Sato K., Takada Y. A mechanism of degradation in leakage currents through ZnO varistors // Journal of Applied Physics. — 1982. — Vol. 53, iss. 12. — P. 8819–8826. DOI: 10.1063/1.330433
8. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Modeling of the degradation electromigrational processes in structures with intercrystallite potential barriers // Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. — 2007. — Vol. 3, iss. 4. — P. 477–490. DOI: 10.1163/157361107782106375
9. Иванченко О. В., Тонкошкур О. С. Електроміграційна модель деградації металооксидних варисторних структур // Український фізичний журнал. — 2012. — Т. 57, № 3. — С. 331–339.
10. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Makarov V. O. Desorption thermal degradation model of zinc oxide ceramics // Journal of the European Ceramic Society. — 2004. — Vol. 24, iss. 15-16. — P. 3709–3712. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.004
11. Гансали Ш. М., Гашимов А. М. Влияние процесса деградации на электрофизические характеристики варисторов // Проблемы энергетики. — 2005. — № 2. — С. 67–69.
12. Дмитриев В. Л., Красавина М. А. «Старение» варисторов в процессе эксплуатации ОПН // Новости электротехники. — 2010. — № 1. — С. 1–8.
13. Philipp H. R., Levinson L. M. Long-time polarization currents in metal-oxide varistors // Journal of Applied Physics. — 1976. — Vol. 47, iss. 7. — P. 3177–3181. — DOI: 10.1063/1.323113
14. Тонкошкур А. С., Гомилко И. В., Ляшков А. Ю. Особенности изотермической деполяризации оксидно-цинковой варисторной керамики // Неорганические материалы. — 1998. — Т. 34, № 9. — С. 1123–1127.
15. Tsonos C., Kanapitsas A., Triantis D., Anastasiadis C., Stavrakas I., Pissis P. Low temperature dielectric relaxations in ZnO varistor // Japanese Journal of Applied Physics. — 2010. — Vol. 49, Iss. 1. — P. 051102–051102-5. DOI: 10.1143/JJAP.49.051102
16. Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors // Journal of the American Ceramic Society. — 1990. — Vol. 73, iss. 7. — P. 1817–1840. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x
17. Tonkoshkur Yu. A., Glot A. B. Isothermal depolarization current spectroscopy of localized states in metal oxide varistors // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2012. — Vol. 45, N 46. — P. 465305–465305-8. DOI: 10.1088/0022-3727/45/46/465305
18. Khandetsky V. S., Tonkoshkur Yu. A. Investigation of recharging processes for the volume localized states in polycrystalline semiconductors // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Фізика. Радіоелектроніка». — 2013. — Vol. 21, N 2, iss. 20. — P. 104–110.
19. Тонкошкур А. С., Клименко В. И., Гомилко И. В. Особенности термодеполяризации явлений в оксидно-цинковой керамике для варисторов // Журнал технической физики. — 1997. — Т. 67, №10. — С. 60–63.
20. Sze S. M. Physics of semiconductor devices. — New York: John Wiley & Sons, 1981.
21. Тонкошкур А. С. Вольт-амперная характеристика оксидно-цинкового варистора // Электронная техника. Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. — 1991. — Вып. 2(83). — С. 15–19.
22. Einzinger R. Development of physical models of varistors on the basis of ZnO // In book: Polycrystalline Semiconductors: Physical Properties and Applications / Ed. G. Harbeke. — Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo: Springer-Verlag, 1985. — P. 228–240.
23. Вашпанов Ю. А., Смыгина В. А. Адсорбционная чувствительность полупроводников. — Одесса: Астропринт, 2005.
24. IEC/EN 60099-4, August 2004: Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a. c. systems.
25. Clarke D. R. Varistor ceramics // Journal of the American Ceramic Society. — 1999. — Vol. 82, iss. 3. — P. 485-502. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb01793.x
26. Ивон А. И. Параметры кристаллитов ZnO в оксидно-цинковой керамике // Неорганические материалы. — 2000. — Т. 36, № 10. — С. 1272–1276.
27. He J., Zeng R., Chen Q., Chen S., Guan Z., Han S. W., Cho H. G. Nonuniformity of electrical characteristics in microstructures of ZnO surge varistors // Power Delivery, IEEE Transactions on. — 2004. — Vol. 19, iss. 1. — P. 138–144. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.820214
28. Тонкошкур О. С., Ігнаткін В. У. Фізичні основи електричного контролю неоднорідних систем. — Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2010.
29. Кисилев В. Ф., Козлов С. Н., Зотеев А. В. Основы физики поверхности твердого тела. — Москва: Издательство МГУ, Физический факультет, 1999.
30. Квасков В. Б. Полупроводниковые приборы с биполярной проводимостью. — Москва: Энергоатомиздат, 1988.

Дата поступления рукописи
в редакцию 24.06 2013 г.

Д. ф.-м. н. О. С. ТОНКОШКУР, к. ф.-м. н. О. В. ИВАНЧЕНКО
Україна, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

КИНЕТИКА ДЕФОРМАЦІЇ ВАХ ОКСИДНИХ ВАРИСТОРНИХ СТРУКТУР, ОБУМОВЛЕНОЇ ПЕРЕЗАРЯДЖЕННЯМ ЛОКАЛІЗОВАНИХ СТАНІВ

Проведено моделювання деформації імпульсних вольт-амперних характеристик (ВАХ) окремого міжкристалітного потенціального бар'єру під час перехідних процесів поляризації/деполяризації, пов'язаної з перезарядженням поверхневих електронних станів, які обумовлюють цей бар'єр. Встановлено, що залежно від концентрації і ступеня заповнення цих поверхневих станів електронами вплив постійної напруги може привести до зміщення імпульсних ВАХ в область великих або ж малих струмів. Показано можливість застосування знайдених закономірностей для керамічних варисторних структур. Запропонована модель дозволяє інтерпретувати спостережувані при випробуваннях варисторов на прискорене старіння «аномальні» ефекти, такі як зростання класифікаційної напруги та зменшення потужності активних втрат.

Ключові слова: вольт-амперна характеристика, поверхневі електронні стани, варистор, деградація, поляризація, деполяризація, відхід напруги, релаксація, міжкристалітний бар'єр.

KINETICS DEFORMATION OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF THE VARISTOR OXIDE STRUCTURES DUE TO OVERCHARGING OF THE LOCALIZED STATES

Prolonged exposure of zinc oxide varistors to the electrical load leads to current-voltage characteristics (CVC) deformation, which is associated with a change in the height and width of the intergranular barriers, which are main structural element of the varistors. Polarization phenomena in zinc oxide ceramics are studied in a number of works, but those are mainly limited to the study of the physics of the CVC deformation process and to determining the parameters of localized electronic states involved in this process. This paper presents the results on the simulation of the deformation of pulse CVC of a separate intergranular potential barrier at transient polarization/depolarization, associated with recharging of surface electronic states (SES), which cause this barrier. It is found that at high density of SES their degree of electron filling is small and the effect of DC voltage leads to a shift of pulse current-voltage characteristics into the region of small currents. Conversely, the low density SES are almost completely filled with electrons, and after crystallite polarization CVC is shifted to high currents. Experimental studies have confirmed the possibility of applying the discovered laws to ceramic varistor structures. The proposed model allows interpreting the «anomalous» effects (such as increase in the classification voltage and reduction of active losses power) observed during the varistors accelerated aging test.

Keywords: current-voltage characteristic, surface electronic states, varistor, degradation, polarization, depolarization, voltage deflection, relaxation, intergranular barrier.

REFERENCES

- Chiang Y. M., Kingery W. D., Levinson L. M. Compositional changes adjacent to grain boundaries during electrical degradation of a ZnO varistor. *Journal of Applied Physics*, 1982, Vol. 55, iss. 3, pp. 1765-1768. DOI: 10.1063/1.331647
- Gupta T. K., Carlson W. G. A grain-boundary defect model for instability/stability of a ZnO varistor. *Journal of Materials Science*, 1985, vol. 20, iss. 10, pp. 3487-3500. DOI: 10.1007/BF01113755
- Makarov V. O., Tonkoshkur A. S., Chernenko I. M. [Influence of thermal vacuum processing on the electrical properties of zinc oxide varistors]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 5. Radiodetali i radiokomponenty*, 1988, iss. 1(70), pp. 18-20. (in Russian)
- Kostić P., Milošević O., Uskoković D., Ristić M. M. Potential barrier degradation at the grain boundary of ZnO-based nonlinear resistors. *Physica B+C*, 1988, vol. 150, iss. 1-2, pp. 175-178. DOI: 10.1016/0378-4363(88)90120-9
- Avdeenko B. K., Tonkoshkur A. S., Chernenko I. M., Ivon A. I., Shchelokov A. I. [Temperature coefficient of resistance of highly nonlinear zinc oxide resistors]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 5. Radiodetali i radiokomponenty*, 1980, iss. 4(41), pp. 17-19. (in Russian)
- Iga A. Drift phenomena of capacitance and current in nonohmic ZnO ceramics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1980, vol. 19, no 1, pp. 201-202. DOI: 10.1143/JJAP.19.201
- Sato K., Takada Y. A mechanism of degradation in leakage currents through ZnO varistors. *Journal of Applied Physics*, 1982, vol. 53, iss. 12, pp. 8819-8826. DOI: 10.1063/1.330433
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Modeling of the degradation electromigrational processes in structures with intercrystallite potential barriers. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2007, vol. 3, iss. 4, pp. 477-490. DOI: 10.1163/157361107782106375
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Electromigration degradation model of metal oxide varistor structures. *Ukrainian Journal of Physics*, 2012, vol. 57, no 3, pp. 330-338.
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Makarov V. O. Desorption thermal degradation model of zinc oxide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, vol. 24, iss. 15-16, pp. 3709-3712. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.004
- Gansali Sh. M., Gashimov A. M. [Influence of degradation process on the electrophysical characteristics of varistors]. *Problemy energetiki*, 2005, no 2, pp. 67-69. (in Russian)
- Dmitriev V. L., Krasavina M. A. [The «aging» of varistors during exploitation process surge arresters]. *Novosti elektrotekhniki*, 2010, no 1, pp. 1-8. (in Russian)
- Philipp H. R., Levinson L. M. Long-time polarization currents in metal-oxide varistors. *Journal of Applied Physics*, 1976, vol. 47, iss. 7, pp. 3177-3181. DOI: 10.1063/1.323113
- Tonkoshkur A. S., Gomilko I. V., Lyashkov A. Yu. Isothermal depolarization in zinc oxide varistor ceramics. *Inorganic Materials*, 1998, vol. 34, no 9, pp. 939-943.
- Tsonos C., Kanapitsas A., Triantis D., Anastasiadis C., Stavrakas I., Pissis P. Low temperature dielectric relaxations in ZnO varistor. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 49, iss. 1, pp. 051102-051102-5. DOI: 10.1143/JJAP.49.051102
- Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, iss. 7, pp. 1817-1840. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x
- Tonkoshkur Yu. A., Glot A. B. Isothermal depolarization current spectroscopy of localized states in metal oxide varistors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, vol. 45, no 46, pp. 465305-465305-8. DOI: 10.1088/0022-3727/45/46/465305
- Khandetsky V. S., Tonkoshkur Yu. A. Investigation of recharging processes for the volume localized states in polycrystalline semiconductors. *Visnyk Dnipropetrovskogo universytetu. Fizyka. Radioelektronika*, 2013, vol. 21, no 2, iss. 20, pp. 104-110.
- Tonkoshkur A. S., Klimenko V. I., Gomilko I. V. [Features of thermodepolarization effects in zinc oxide ceramics for varistors]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1997, vol. 67, no 10, pp. 60-63. (in Russian)
- Sze S. M. *Physics of semiconductor devices*. 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, 1981, 880 p.
- Tonkoshkur A. S. [Current-voltage characteristic of zinc oxide varistor]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 5. Radiodetali i radiokomponenty*, 1991, iss. 2(83), pp. 15-19. (in Russian)
- Einzig R. Development of physical models of varistors on the basis of ZnO. *In book: Polycrystalline Semiconductors: Physical Properties and Applications*, ed. G. Harbeke, Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo, Springer-Verlag, 1985, pp. 228-240.
- Vashpanov Yu. A., Smyntyna V. A. *Adsorbtsionnaya chuvstvitel'nost' poluprovodnikov* [Adsorption sensitivity of semiconductors]. Odessa, Astroprint, 2005, 216 p.
- IEC/EN 60099-4, August 2004: Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a. c. systems.
- Clarke D. R. Varistor ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 1999, vol. 82, iss. 3, pp. 485-502. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb01793.x
- Ivon A. I. Parameters of ZnO grains in ZnO-based ceramics. *Inorganic materials*, 2000, vol. 36, no 10, pp. 1074-1077.
- He J., Zeng R., Chen Q., Chen S., Guan Z., Han S. W., Cho H. G. Nonuniformity of electrical characteristics in microstructures of ZnO surge varistors. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2004, vol. 19, iss. 1, pp. 138-144. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.820214
- Tonkoshkur O. S., Ignatkin V. U. *Fizichni osnovi elektrichnogo kontrolyu neodnorodnikh sistem* [Physical fundamentals of electrical control of heterogeneous systems]. Dneprodzerzhinsk, DDTU, 2010. 290 p.
- Kisilev V. F., Kozlov S. N., Zoteev A. V. *Osnovy fiziki poverkhnosti tverdogo tela* [Fundamentals of physics of solid body surface]. Moscow, Izdatelstvo MGU. Fizicheskyy fakultet, 1999, 284 p.
- Kvaskov V. B. *Poluprovodnikovyye pribory s bipolyarnoi provodimost'yu* [Semiconductor devices with bipolar conductivity]. Moscow, Energoatomizdat, 1988, 128 p.