



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 538.91, 539.143.5

МЕМРИСТОРНЫЙ ЭФФЕКТ В СЛОИСТЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ

В. Т. ФАМ, Д. А. ПОДРЯБИНКИН, Е. Б. ЧУБЕНКО, В. Е. БОРИСЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 18.12.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Предложены эквивалентные электрические схемы многослойных пленочных структур с мемристорным переключением сопротивления на межслойных границах и на границах кристаллических зерен в каждом слое. Численное моделирование вольт-амперных характеристик таких структур показало, что их типичный для мемристоров петлеобразный вид трансформируется в линейную омическую зависимость общего тока от величины приложенного внешнего напряжения по мере увеличения как количества слоев, так и количества зерен в каждом слое. Установлено определенное сочетание количества слоев и зерен в слое, при котором максимальный протекающий через структуру общий ток и отношение сопротивлений в «выключенном» и «включенном» состояниях достигают наибольших значений.

Ключевые слова: мемристор, моделирование, слоистая пленка, эквивалентная схема, вольт-амперная характеристика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы признательны А. Л. Данилюку за полезное обсуждение предложенной модели и результатов расчетов по ней. Работа выполнена в рамках проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Ф22-114.

Для цитирования. Мемристорный эффект в слоистых пленочных структурах / В. Т. Фам [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-5-13>.

MEMRISTOR EFFECT IN LAYERED FILM STRUCTURES

VAN T. PHAM, DENIS A. PODRYABINKIN, EUGENE B. CHUBENKO,
VICTOR E. BORISENKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 18.12.2023

Abstract. Equivalent electrical circuits of multilayer film structures with memristor switching of resistance at interlayer boundaries and at the boundaries of crystal grains in each layer are proposed. Numerical modeling of the current-voltage characteristics of such structures has shown that their loop-shaped form, typical of memristors, is transformed into a linear ohmic dependence of the total current on the magnitude of the applied external voltage as both the number of layers and the number of grains in each layer increase. A certain combination of the number of layers and grains in a layer has been established, at which the maximum total current flowing through the structure and the ratio of resistances in the “off” and “on” states reach the highest values.

Keywords: memristor, modeling, layered film, equivalent scheme, current-voltage characteristic.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors thank A. L. Daniluk for usetal discussion of the proposed model and numerical results obtained. The work was performed within the grant of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research F22-114.

For citation. Pham V. T., Podryabinkin D. A., Chubenko E. B., Borisenko V. E. (2024) Memristor Effect in Layered Film Structures. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-5-13> (in Russian).

Введение

Мемристорный эффект, представляющий собой изменение электрического сопротивления твердотельной структуры по достижении определенного напряжения на контактах к ней, что приводит к гистерезису ее вольт-амперной характеристики (ВАХ), имеет существенный интерес для создания нового поколения ячеек памяти [1]. Размеры этих ячеек могут быть уменьшены до нанометровых величин благодаря использованию наноструктурированных тонких пленок из полупроводников. Реальная поликристалличность или блочная структура таких пленок приводит к тому, что мемристорный эффект в них может проявляться при протекании тока как в плоскости, так и перпендикулярно плоскости пленок вследствие определяющей роли в нем процессов на границах кристаллических зерен (блоков) [2–6]. При этом в пленках с выраженной слоистой структурой механизмы внутри- и межслойного переключений каналов переноса носителей заряда могут отличаться. С учетом этого предложены эквивалентные схемы таких структур и выполнены расчеты их ВАХ, которые представлены в статье.

Модель и эквивалентные схемы

Основу предлагаемых эквивалентных схем составляют разработанные авторами модельные представления о слоистой пленочной структуре [7], в рамках которых протекание тока внутри кристаллических зерен через их внутри- и межслойные границы описано линейными резистивными элементами. Учет мемристорного эффекта осуществлен заменой резисторов, соответствующих внутри- и межслойным границам, на мемристоры с гистерезисом ВАХ.

В качестве такого элемента была выбрана одномерная модель мемристора с жестким переключением, рассмотренная в [8], структурная и эквивалентная схемы которого показаны на рис. 1. Предполагается, что мемристор длиной D разделен на две области, характеризующиеся соответственно высокой (R_{ON}) и низкой (R_{OFF}) проводимостями. Граница, разделяющая эти области, способна изменять свое положение в зависимости от количества прошедшего через мемристор заряда q . Если протяженность области с высокой проводимостью w равна длине мемристора, то отношение $w/D = 1$ и проводимость мемристора полностью определяются электрическим сопротивлением этой области. При уменьшении длины области с высокой проводимостью до нуля (при $w/D = 0$) сопротивление мемристора определяется только областью с высоким сопротивлением.

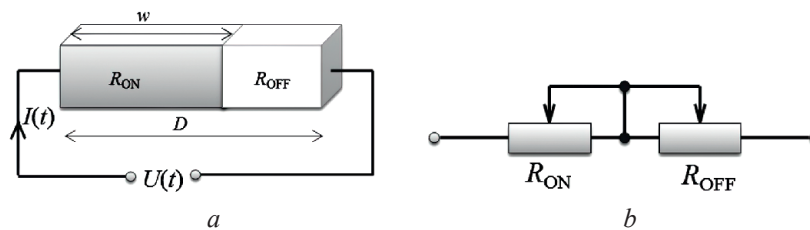


Рис. 1. Модель рабочей области мемристора (a) и его эквивалентная электрическая схема (b)
Fig. 1. Model of the active region of a memristor (a) and its equivalent electrical circuit (b)

Математическая модель рассматриваемого мемристора может быть представлена уравнениями [8]:

$$R_M(w) = R_{ON} \frac{w}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{w}{D}\right); \quad (1)$$

$$I(t) = R_M^{-1}(w)U(t), \quad (2)$$

где $R_M(w)$ – сопротивление мемристора, Ом; $I(t)$ – протекающий через мемристор ток, А; $U(t)$ – напряжение, приложенное к мемристор, В; t – время, с.

Изменение со временем длины w области высокой проводимости R_{ON} описывается уравнением

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu \frac{R_{ON}}{D} I(t), \quad (3)$$

где μ – средняя подвижность частиц, ответственных за появление мемристорного эффекта, зависящая от используемого материала пленки, $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Интегрируя уравнение (3), можно получить зависимость величины w от количества прошедшего через мемристор заряда $q(t)$

$$w(t) = w_0 + \mu \frac{R_{ON}}{D} q(t), \quad (4)$$

где w_0 – постоянная интегрирования, физическим смыслом которой является начальное значение величины w ; $q(t)$ определяется по формуле

$$q(t) = \int_0^t I(t) dt. \quad (5)$$

Величина прошедшего через мемристор заряда $q(t)$ так же, как и зависимость тока $I(t)$ от времени, в общем случае не известна. Для преодоления этой неопределенности при расчете ВАХ мемристоров получено решение уравнений (1)–(3) для тока в зависимости от напряжения $U(t)$ с известной функцией изменения во времени, так как оно задается внешним источником напряжения:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R_{OFF}} \left[1 - 2 \frac{\mu}{D^2} \left(1 - \frac{R_{ON}}{R_{OFF}} \right) \frac{R_{ON}}{R_{OFF}} \int_0^t U(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что при $t = 0$ $I(0) = U/R_{OFF}$. С ростом напряжения $U(t)$ знаменатель уменьшается, обеспечивая нелинейное возрастание тока, а при приближении знаменателя к нулю с увеличением интеграла $\int_0^t U(t) dt$ происходит резкий рост тока, что качественно адекватно отражает проявление мемристорного эффекта.

Предлагаемая эквивалентная схема многослойной (на примере трехслойной) пленочной структуры, в которой мемристорное переключение сопротивления R_{M1} имеет место только на границах зерен внутри каждого слоя, представлена на рис. 2.

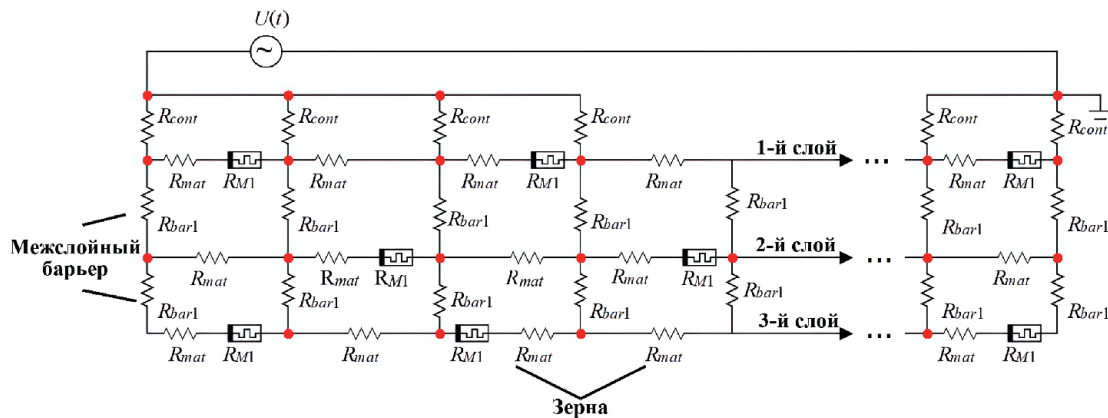


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема трехслойной пленки с мемристорным переключением сопротивления на межзеренных границах внутри каждого слоя

Fig. 2. Equivalent electrical circuit of a three-layered films with memristive switching at grain boundaries in each layer

Протекание тока через подводящие контакты, внутри кристаллических зерен и через межслойные границы контролируется соответствующими линейными резистивными элементами – R_{cont} , R_{mat} , R_{bar1} . Предполагается идентичность свойств кристаллических зерен, межзеренных

и межслоевых границ. Учтено, что кристаллические зерна в соседних слоях могут быть смещены друг относительно друга.

Для многослойной пленки с межслоевым мемристорным переключением сопротивления эквивалентная электрическая схема показана на рис. 3. Она получена заменой в предыдущей эквивалентной схеме R_{M1} на R_{bar2} и R_{bar1} на R_{M2} .

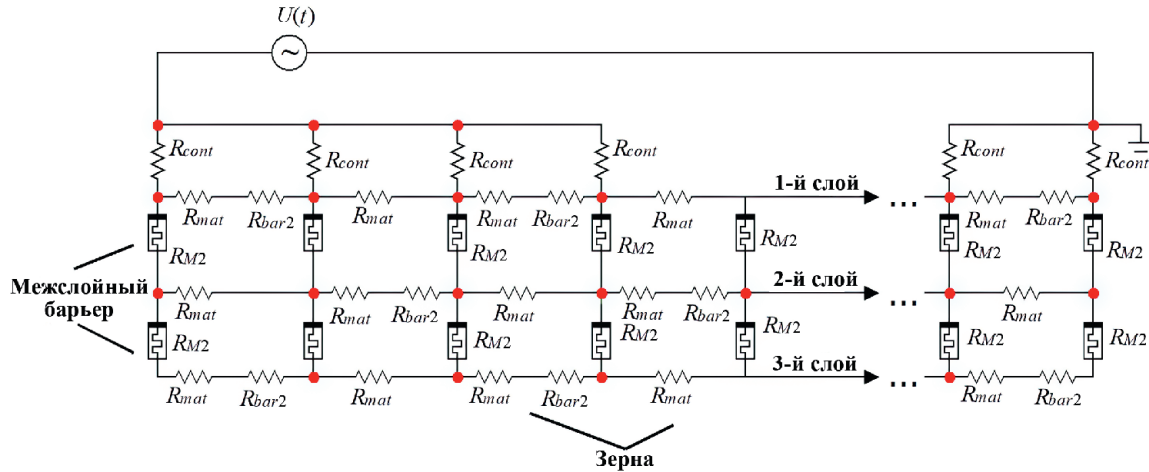


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема трехслойной пленки с мемристорным переключением сопротивления на межслоевых границах

Fig. 3. Equivalent electrical circuit of three-layered films with memristive switching at layer boundaries

Эквивалентная схема для случая мемристорного эффекта одновременно на межзеренных и межслоевых границах получена включением дополнительных мемристорных элементов в одну из приведенных схем. Рассмотренные варианты были использованы для анализа ВАХ, регистрируемых при пропускании тока в плоскости пленки, лежащей на изолирующей подложке. Однако после переноса одного из электрических контактов к нижнему слою пленки они пригодны и для моделирования ВАХ при пропускании тока перпендикулярно плоскости пленки, лежащей на электропроводящей подложке.

Моделирование ВАХ многослойных пленок по предложенным эквивалентным схемам осуществляли в программном комплексе Micro-Cap 12. Количество слоев изменяли от 3 до 9, а количество кристаллических зерен в слое – от 15 до 30. Величины сопротивлений, представленные в табл. 1, выбирали на основе оценок электронных свойств материалов, демонстрирующих мемристорный эффект [2–6].

Таблица 1. Параметры, использованные при моделировании вольт-амперных характеристик слоистых пленочных структур

Table 1. Parameters used in modeling the current-voltage characteristics of layered film structures

R_{ON} , Ом	R_{OFF} , кОм	R_{INIT} , кОм	R_{cont} , Ом	R_{mat} , Ом	R_{bar1} , Ом	R_{bar2} , Ом
Для моделирования R_{M1}						
100	100	20	0,001	100	500	1000
Для моделирования R_{M2}						
10	10	1	0,001	100	500	1000
Примечание – R_{INIT} – начальное сопротивление мемристора, определяемое отношением w/D [9].						

Различия в величинах параметров для мемристоров R_{M1} и R_{M2} , а также R_{bar1} и R_{bar2} призваны учесть тот факт, что площадь межзеренных границ не менее чем на порядок меньше площади межслоевых границ. Расчеты выполнены для переменного внешнего напряжения $U(t) = U_0 \sin(2\pi t)$, где $U_0 = 10$ В. По рассчитанным ВАХ анализировали влияние количества слоев и количества кристаллических зерен в каждом слое на максимальный ток, протекающий в плоскости пленки, и на отношение R_{max}/R_{min} в точке ВАХ, соответствующей максимальному току. Величина этого отношения актуальна для оценки перспектив применения конкретных мемристорных структур в системах электронной цифровой обработки и хранения информации.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 4 приведены ВАХ структур, в которых мемристорное переключение сопротивления происходит только на межзеренных границах внутри каждого слоя, что учтено в эквивалентной схеме, показанной на рис. 2. В качестве примера взята семислойная пленка на изолирующей подложке, а рассчитанные ВАХ отличаются количеством кристаллических зерен в слое. Для сравнения показана и ВАХ единичного мемристора.

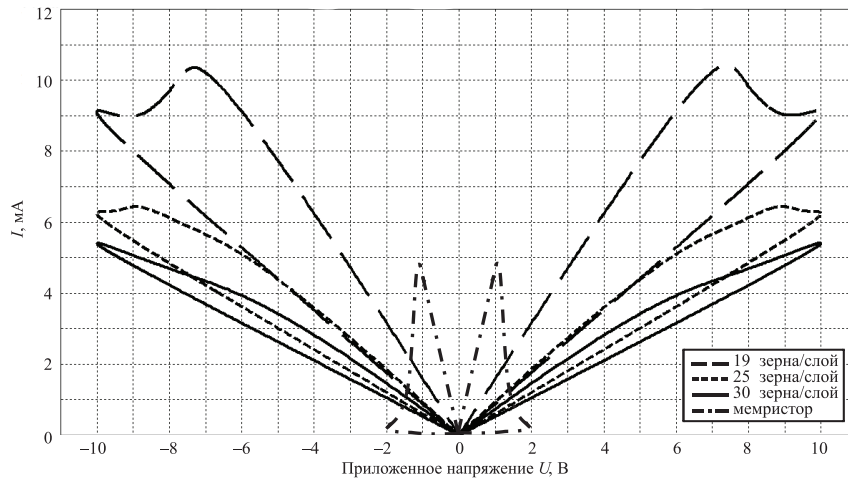


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики семислойных пленочных структур с мемристорным переключением сопротивления на межзеренных границах в зависимости от количества кристаллических зерен в каждом слое

Fig. 4. Current-voltage characteristics of seven layers films with memristive switching of resistance at crystal grain boundaries for different numbers of grains in each layer

Петлеобразный вид рассчитанных ВАХ хотя и является типичным для мемристорных структур, существенно отличается от ВАХ единичного мемристора. Переключение всей структуры из высокоомного в низкоомное состояние происходит при большем внешнем приложенном напряжении. Его величина возрастает с увеличением количества кристаллических зерен в одном слое. При этом изменяется максимальный ток, протекающий через многослойную структуру, и уменьшается ширина петли. Зависимость этих изменений одновременно от количества зерен и слоев иллюстрируют данные, приведенные на рис. 5.

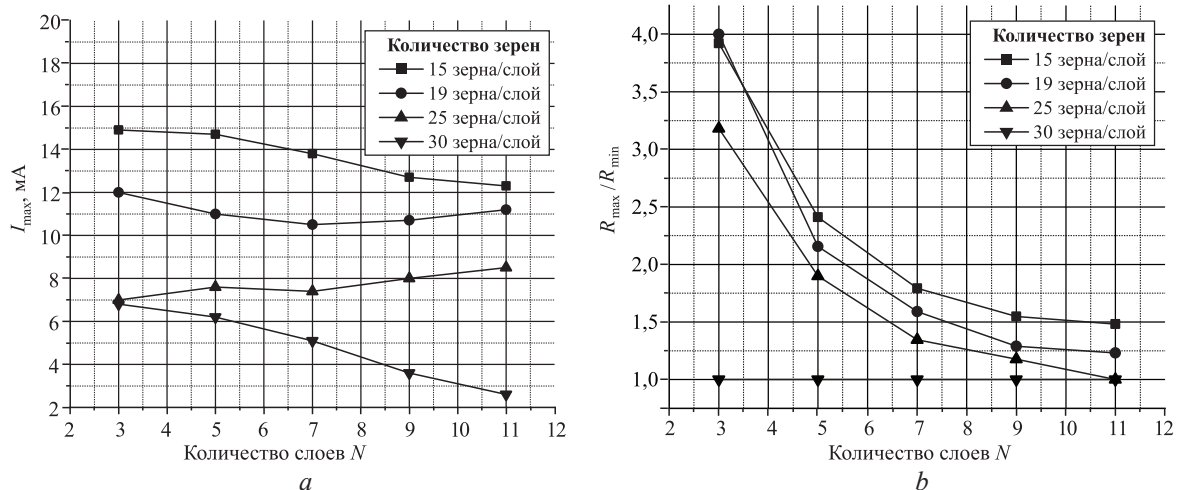


Рис. 5. Максимальный ток I_{\max} (a) и отношение R_{\max}/R_{\min} (b) в многослойных пленочных структурах с мемристорным переключением сопротивления на межзеренных границах

в зависимости от количества слоев N для различного количества кристаллических зерен в каждом слое
Fig. 5. Peak current I_{\max} (a) and the rate R_{\max}/R_{\min} (b) in multilayered film structures with memristive switching of resistance at grain boundaries as a function of number of layers N for different numbers of crystal grains in each layer

Показатели на рис. 5 сняты с ВАХ, рассчитанных для всех анализируемых сочетаний количества слоев и количества зерен в слое. Изменение максимального тока носит переменный характер. Он монотонно снижается с увеличением количества слоев при «малом» и «большом» количестве зерен в слое (соответственно 15 и 30 зерен), хотя в промежутке между этими значениями демонстрирует незначительный рост. Такие зависимости находят объяснение, если учесть конкурирующую роль параллельных каналов протекания тока, количество которых увеличивается с возрастанием количества слоев, и рост последовательно включаемых при этом сопротивлений межслойных барьеров R_{bar1} .

В отличие от закономерностей изменения максимального тока отношение R_{max}/R_{min} , характеризующее ширину петли ВАХ, монотонно уменьшается как с увеличением количества слоев, так и с возрастанием количества зерен в слое. При количестве зерен 30 и более петля вообще отсутствует ($R_{max}/R_{min} = 1$) при любом количестве слоев. К этому результату, как к асимптоте, стремятся и отношения R_{max}/R_{min} при меньших количествах зерен в слое, что свидетельствует об определяющей роли омических сопротивлений в общем токе, протекающем через многослойную структуру.

На рис. 6 представлены ВАХ структур, в которых мемристорное переключение сопротивления происходит только на межслойных границах, что отражено в эквивалентной схеме, показанной на рис. 3. В качестве примера, так же, как и в предыдущем случае, взята семислойная пленка на изолирующей подложке, а рассчитанные ВАХ отличаются количеством кристаллических зерен в слое.

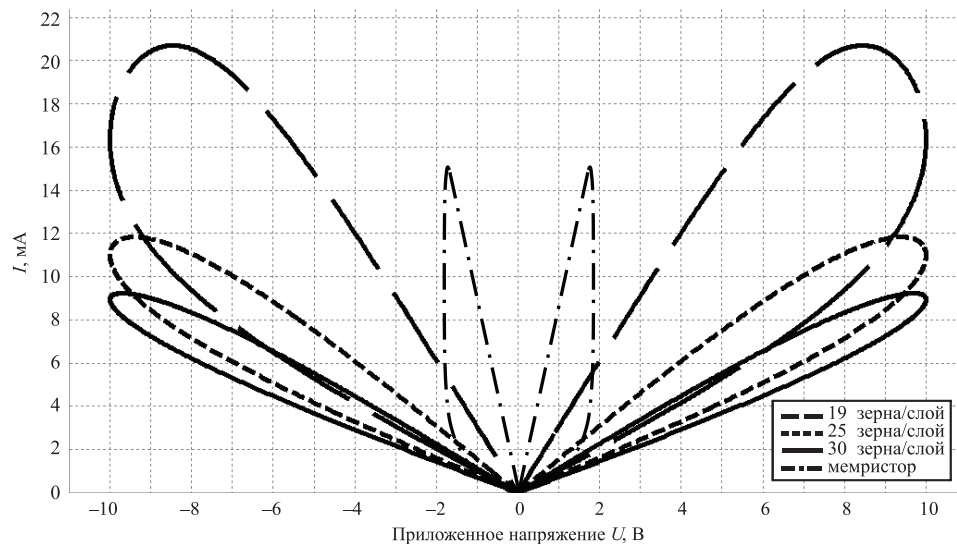


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики семислойных пленочных структур с мемристорным переключением сопротивления на межслойных границах в зависимости от количества кристаллических зерен в каждом слое

Fig. 6. Current-voltage characteristics of seven layers films with memristive switching of resistance at layer boundaries for different numbers of grains in each layer

Характерный для мемристорного переключения сопротивления петлеобразный внешний вид ВАХ сохраняется и в случае его проявления только на межслойных границах. Однако количественные характеристики такого переключения приобретают определенные особенности. Во-первых, возрастает максимальный ток, протекающий через структуру. Это объяснимо меньшими величинами мемристорных сопротивлений, использованных в расчетах, чтобы учесть то, что площадь межслойных границ больше площади межзеренных границ. Во-вторых, изменяется характер зависимостей I_{max} и R_{max}/R_{min} от количества слоев при различном количестве зерен в слое (рис. 7). Следует отметить, что эти зависимости приобретают характерные максимумы для пленок, состоящих из 7–9 слоев.

Немонотонный характер приведенных зависимостей объясняется конкуренцией между последовательно соединенными и параллельными каналами проводимости в многослойной структуре. Увеличение параллельно включенных каналов и количества слоев ведет к возрастанию максимального тока и тем большему, чем меньше количество зерен в каждом слое. При этом общий ток определяется сопротивлениями R_{max} и R_{bar2} .

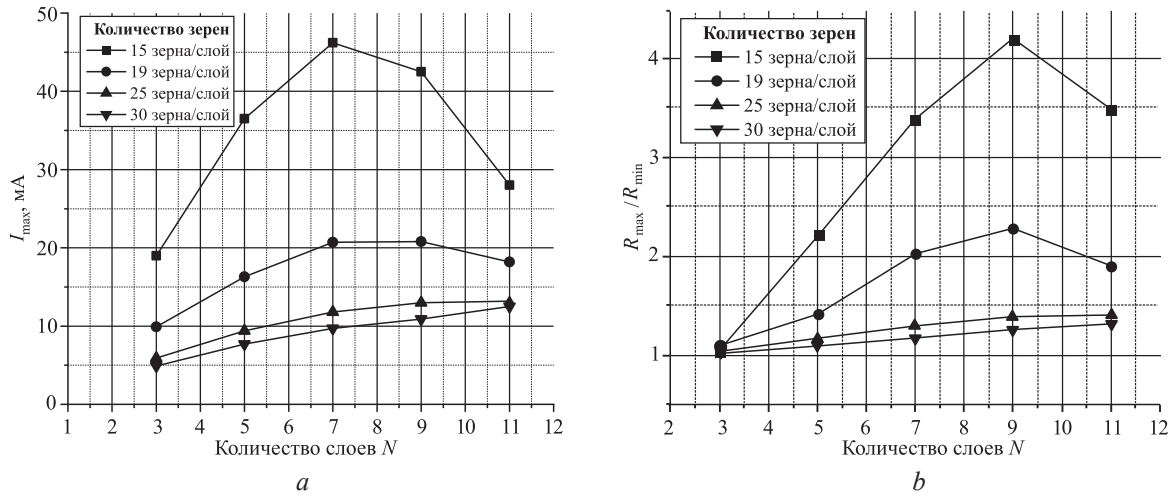


Рис. 7. Максимальный ток I_{\max} (a) и отношение R_{\max}/R_{\min} (b) в многослойных пленочных структурах с мемристормым переключением сопротивления на межслоевых границах в зависимости от количества слоев N для различного количества кристаллических зерен в каждом слое
Fig. 7. Peak current I_{\max} (a) and the rate R_{\max}/R_{\min} (b) in multilayered film structures with memristive switching of resistance at layer boundaries as a function of number of layers N for different numbers of crystal grains in each layer.

По достижении определенного количества слоев (в рассматриваемых расчетах – 7–9) основную роль, ограничивающую ток, начинают приобретать последовательно соединенные сопротивления мемристоров, включенных между слоями. Максимальный ток I_{\max} и отношение R_{\max}/R_{\min} имеют тенденцию к снижению. При этом в исследованном диапазоне изменения количества слоев и зерен в слое величина отношения R_{\max}/R_{\min} хоть и уменьшается, но своего асимптотического значения, равного единице, не достигает. Несмотря на уменьшение I_{\max} и отношения R_{\max}/R_{\min} , эти параметры остаются в динамичном состоянии, не достигая установившихся значений, что подчеркивает важность учета конкуренции между различными каналами проводимости в многослойных структурах. Таким образом, представленные результаты демонстрируют влияние структурных факторов на электрические свойства системы, открывая перспективы для дальнейших исследований в области многослойных структур с мемристормыми элементами. Одновременное проявление мемристормого переключения на межзеренных и межслоевых границах иллюстрируют ВАХ, приведенные на рис. 8.

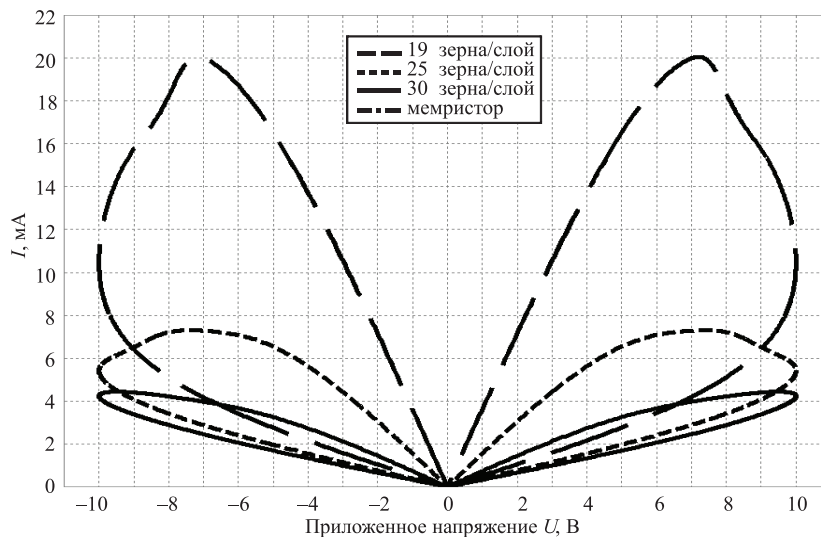


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики семислойных пленочных структур с мемристормым переключением сопротивления на межзеренных и межслоевых границах в зависимости от количества кристаллических зерен в каждом слое
Fig. 8. Current-voltage characteristics of seven layers films with memristive switching of resistance both at grains and layer boundaries for different numbers of grains in each layer

Следует отметить стабильность общей формы вольт-амперных характеристик, которая сохраняется в виде петлеобразной структуры. Это свидетельствует о консистентности эффектов в системе при изменении структурных параметров. В контексте представленных на рис. 9 зависимостей I_{\max} и R_{\max}/R_{\min} от числа слоев и зерен в слое отчетливо прослеживается близость как в качественном, так и в количественном отношении к аналогичным зависимостям, полученным при включении мемристорных элементов на границах между слоями. Результаты исследования подтверждают, что параметры структуры, такие как количество слоев и зерен, существенно влияют на электрические характеристики системы, а форма петлеобразных ВАХ остается устойчивой при варьировании этих параметров. Примечательно, что как I_{\max} , так и R_{\max}/R_{\min} в системе с мемристорами между слоями проявляют схожие зависимости с системой, включающей мемристоры на межслойных границах, подчеркивая важность структурных особенностей в формировании электрических свойств. Итак, зависимости I_{\max} и R_{\max}/R_{\min} от количества слоев и количества зерен в слое качественно и количественно ближе к аналогичным зависимостям, полученным при включении мемристорных элементов на межслойных границах.

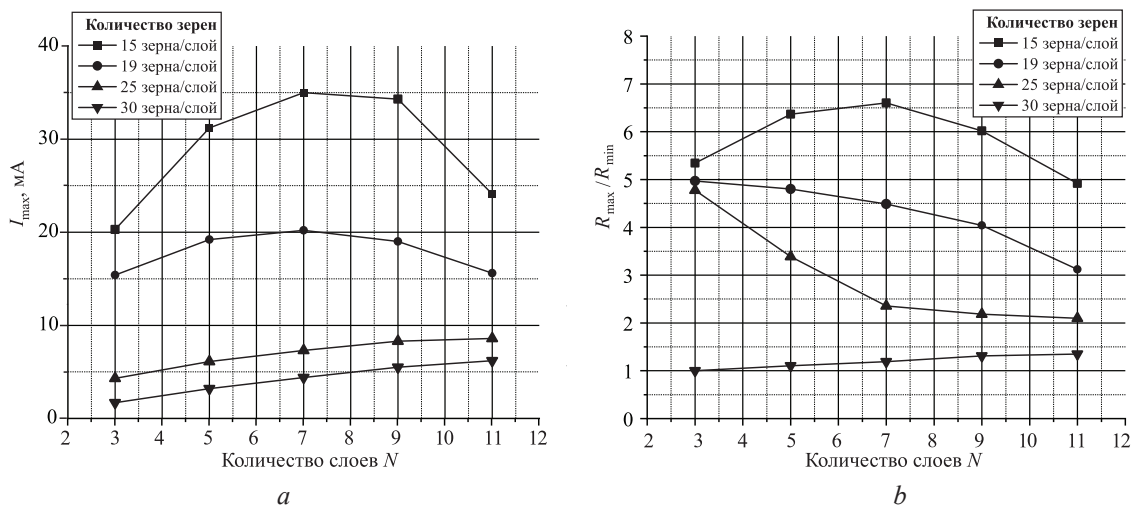


Рис. 9. Максимальный ток I_{\max} (a) и отношение R_{\max}/R_{\min} (b) в многослойных пленочных структурах с мемристорным переключением сопротивления на межзеренных и межслойных границах в зависимости от количества слоев N для различного количества кристаллических зерен в каждом слое
Fig. 9. Peak current I_{\max} (a) and the rate R_{\max}/R_{\min} (b) in multilayered film structures with memristive switching of resistance at both grain and layer boundaries as a function of number of layers N for different numbers of crystal grains in each layer

Немонотонное изменение I_{\max} и R_{\max}/R_{\min} в зависимости от количества слоев наиболее выражено для «малого» (15–19) количества зерен в слое. Это свидетельствует об определяющей роли мемристорного переключения сопротивления на межслойных границах. При больших количествах зерен ВАХ всей многослойной структуры начинает контролироваться мемристорным эффектом на межзеренных границах.

Заключение

1. Предложенные эквивалентные электрические схемы многослойных пленочных структур с кристаллическими зёрнами в каждом слое и моделирование их вольт-амперных характеристик позволяют обобщить некоторые закономерности проявления в них мемристорного переключения сопротивления на межзеренных и межслойных границах. Приведенные количественные оценки получены для определенных номиналов омических резисторов и мемристоров. Они актуальны для общезначимых модельных представлений, но требуют уточнения для структур из определенных материалов.

2. В результате исследований установлено, что характерный для мемристоров петлеобразный вид вольт-амперных характеристик постепенно трансформируется в линейную омическую зависимость общего тока от величины приложенного внешнего напряжения по мере увеличения количества слоев и количества зерен в слое многослойной пленочной структуры. При этом мемристорное переключение сопротивления на межслойных границах наиболее значимо проявляется

в вольт-амперных характеристиках всей структуры, поскольку площадь таких границ обычно намного больше межзеренных границ.

3. Отмечено существование определенного сочетания количества слоев и зерен в слое, обеспечивающего максимальные значения протекающего тока I_{\max} и отношения сопротивлений R_{\max}/R_{\min} , характеризующих «выключенное» и «включенное» состояния всей структуры.

Список литературы / References

1. Joshua Yang J., Feng Miao, Matthew D. Pickett, Douglas A. A. Ohlberg, Duncan R. Stewart, Chun Ning Lau, et al. (2009) The Mechanism of Electroforming of Metal Oxide Memristive Switches. *Nanotechnology*. 20 (21). DOI: 10.1088/0957-4484/20/21/215201.
2. Lei Zhang, Tian Gong, Huide Wang, Zhinan Guo, Han Zhang (2019) Memristive Devices Based on Emerging Two-Dimensional Materials Beyond Graphene. *Nanoscale*. 11 (26), 12413–12435.
3. Ki Chang Kwon, Ji Hyun Baek, Kootak Hong, Soo Young Kim, Ho Won Jang (2022) Memristive Devices Based on Two-Dimensional Transition Metal Chalcogenides for Neuromorphic Computing. *Nano-Micro Lett.* 14 (1). DOI: 10.1007/s40820-021-00784-3.
4. Sabeen F., Hakim M. W., Akinwande D., Rizwan S. (2022) Graphene and MXene Based Free-Standing Carbon Memristors for Flexible 2D Memory Applications. *Adv Elect Materials*. 8 (1).
5. Da Li, Bin Wu, Xiaojian Zhu, Juntong Wang, Byunghoon Ryu, Wei D. Lu, et al. (2018) MoS₂ Memristors Exhibiting Variable Switching Characteristics Toward Biorealistic Synaptic Emulation. *ACS Nano*. 12 (9), 9240–9252. DOI: 10.1021/acsnano.8b03977.
6. Ascoli A., Menzel S., Rana V., Kempen T., Messaris I., Demirkol A. S., et al. (2022) A Deep Study of Resistance Switching Phenomena in TaO_x ReRAM Cells: System-Theoretic Dynamic Route Map Analysis and Experimental Verification. *Adv Elect Materials*. 8 (8).
7. Van Tung Pham, Chubenko E. B., Borisenko V. E. (2023) Resistor Model of Layered Film Structures. *Doklady BGUIR*. 21 (2), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-2-14-20> (in Russian).
8. Xiaojun Wang, Bai Sun, Xiaoxia Li, Bolin Guo, Yushuang Zeng, Shuangso Mao, et al. (2018) Influence of the Voltage Window on Resistive Switching Memory Characteristics Based on g-C₃N₄ Device. *Ceramics International*. 44 (15), 18108–18112. DOI:10.1016/j.ceramint.2018.07.016.
9. Biolek Z., Biolek D., Biolková V. (2009) *SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift*. 18 (2), 210–214.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Фам В. Т., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Подрябинкин Д. А., канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Чубенко Е. Б., канд. техн. наук, доц., доц. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Борисенко В. Е., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-75
E-mail: v.tu2103@gmail.com
Фам Ван Тунг

Information about the authors

Pham V. T., Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Podryabinkin D. A., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Chubenko E. B., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Borisenko V. E., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-75
E-mail: v.tu2103@gmail.com
Pham Van Tung