

УДК 53.097

**П.Е. Троян, В.И. Зеленский, В.В. Карапанский**

## Импульсные характеристики наноструктур металл–диэлектрик–металл

Рассмотрены импульсные характеристики тонкопленочной наноструктуры на основе пленки оксинитрида кремния, указывающие на мемристорные свойства наноструктуры. Исследованы ВАХ и переключения структур из состояния высокого сопротивления в состояние высокой проводимости в импульсном режиме. Установлено, что переключение высокого сопротивления в высокую проводимость осуществляется за более длительный промежуток времени по сравнению с переключением из высокой проводимости в высокое сопротивление. Между состояниями высокого сопротивления и высокой проводимости возможно состояние с промежуточной проводимостью.

**Ключевые слова:** тонкопленочная наноструктура, металл–диэлектрик–металл, импульсные характеристики, мемристорные свойства.

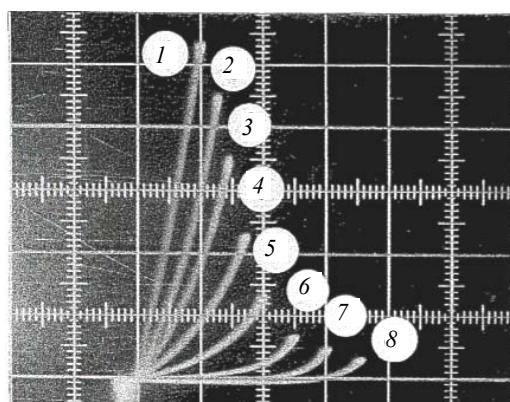
**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-4-17-20

В тонкопленочной наноструктуре металл–диэлектрик–металл (МДМ-структура) в результате воздействия сильного электрического поля с напряженностью более  $10^9$  В/м наблюдаются такие представляющие интерес для наноэлектроники физические свойства, как эмиссия электронов в вакуум и вольт-амперная характеристика с участком отрицательного дифференциального сопротивления и гистерезисом, характеризующимся двумя состояниями: высокой проводимостью,  $0,5 \text{ Ом}^{-1}$  (ВП) и высоким сопротивлением  $10^6\text{--}10^7$  Ом (ВС) [1–6].

Интерес к МДМ-структурям в настоящее время обусловлен наличием у них мемристорных свойств и потенциальной возможности разработки мемристорного элемента памяти [7, 8].

В этой связи представляет интерес изучение токопереноса в МДМ-структуре в импульсном режиме [9]. Структура М-Д-М ( $\text{Al-SiO}_2\text{-Al}$ ), площадь структуры 1 на  $1 \text{ mm}^2$  получены методом термического испарения при нанесении электродов. Диэлектрик получен магнетронным распылением кремниевой мишени.

На рис. 1 представлены типичные зависимости тока, протекающего между электродами металл–металл МДМ-структуры, от амплитуды напряжения, приложенного к электродам.



По вертикали: 5 мА/дел. По горизонтали: 5 В/дел.  
Рис. 1. Вольт-амперная характеристика сквозного тока

Если провести кривую через максимальные значения токов, то огибающая характеристика тока представляет собой зависимость с участком отрицательной дифференциальной проводимости. Значение напряжения  $V$ , при котором достигается максимум сквозного тока, составляет 3–4 В.

Семейство динамических вольт-амперных характеристик сквозного тока определяется амплитудой приложенного напряжения  $V$ . В случае, если  $V < V_{\max}$ , вольт-амперная характеристика близка к линейной. При  $V > V_{\max}$  вольт-амперная характеристика имеет вид кривых 2–8, причем амплитуда сквозного тока уменьшается с увеличением амплитуды напряжения.

Переходные характеристики сквозного тока зависят от состояния образца, обусловленного предыдущим воздействием напряжения.

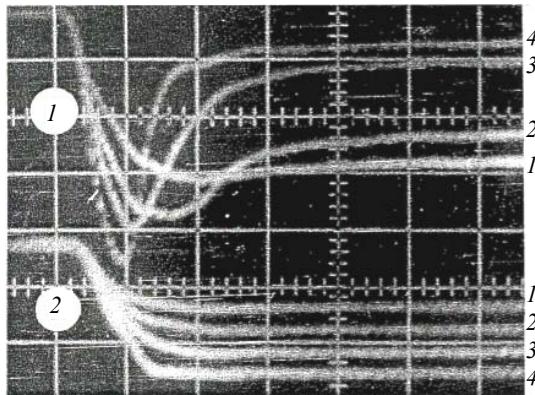
В зависимости от воздействия напряжения образец может находиться либо в состоянии ВП, либо в состоянии ВС (перед исходным состоянием). Исходное состояние образца: высокая проводимость – ВП.

При воздействии импульса напряжения с амплитудой  $V < V_{\max}$  форма импульса сквозного тока повторяет форму импульса напряжения. Амплитуда тока зависит от приложенного напряжения в соответствии с динамической вольт-амперной характеристикой (рис. 1, кривая 1). После окончания действия импульса напряжения состояние ВП сохраняется.

При условии  $V < V_{\max}$  осциллограммы импульсов сквозного тока имеют вид, показанный на рис. 2.

Максимальное значение амплитуды сквозного тока достигается при  $V = V_{\max}$ . При  $V < V_{\max}$  образец остается в исходном состоянии высокой проводимости (ВП). С дальнейшим увеличением  $V$  наблюдается уменьшение проводимости образца, что указывает на переход (переключение) в состояние высокого сопротивления (ВС).

Исходное состояние образца: высокое сопротивление – ВС.



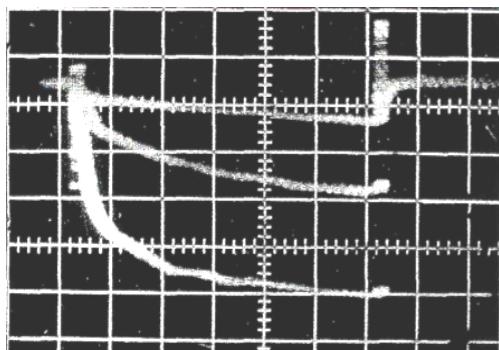
По вертикали: 25 мА/дел.; 2 – 5 В/дел.

По горизонтали: 0,25 мкс/дел.

Рис. 2. Осциллограммы импульсов сквозного тока

При амплитуде напряжения  $V < V_S$ , где  $V_S < V_{\max}$  – значение порогового напряжения для данного состояния ВС, исходное состояние сохраняется. При увеличении амплитуды напряжения в интервале  $V_S < V < V_{\max}$  происходит увеличение амплитуды тока с возрастанием крутизны фронта импульса (рис. 3).

При этом проводимость образца возрастает, что указывает на переход (переключение) в состояние высокой проводимости – ВП. При этом установлено, что скорость переключения ВС–ВП зависит от амплитуды приложенного импульса напряжения и возрастает с увеличением значения  $V_M$ . Значение сквозного тока увеличивается с течением времени при неизменной амплитуде приложенного к образцу импульса напряжения (рис. 4). Кроме того, переключение ВС–ВП осуществляется за более длительный промежуток времени по сравнению с переключением ВП–ВС.



По вертикали: 2,5 мА/дел. По горизонтали: 25 мкс/дел.

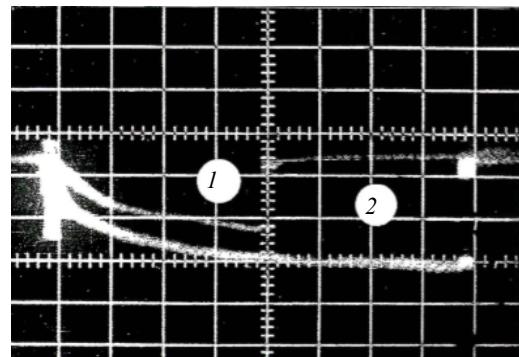
Рис. 3. Осциллограмма импульсов сквозного тока при увеличении амплитуды

При воздействие на образец следующих друг за другом одиночных прямоугольных импульсов, с амплитудой от 0 до 20 В, различной длительностью от 50 до 200 мкс, напряжения одинаковой амплитуды приводят к увеличению тока через образец до некоторого максимального значения (рис. 5).

При воздействии на образец импульса напряжения амплитудой  $V > V_{\max}$  осциллограмма сквозного тока имеет вид, приведенный на рис. 6.

Значение проводимости образца после воздействия импульса напряжения зависит от амплитуды

импульса напряжение, в результате воздействия которого было получено исходное состояние ВС.



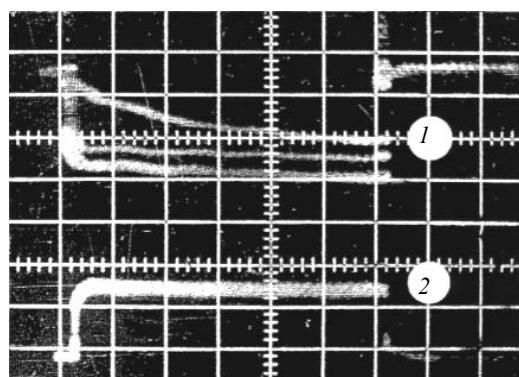
По вертикали: 2,5 мА/дел.

По горизонтали: 1 – мкс/дел.; 2 – 50 мкс/дел.

Рис. 4. Осциллограмма импульса сквозного тока в зависимости от времени

В зависимости от амплитуды воздействия импульса на образец формируется состояние с различным значением проводимости от  $10^{-6}$  до  $0,5 \text{ Ом}^{-1}$ . Вид промежуточных характеристик зависит от амплитуды воздействующего напряжения на образец.

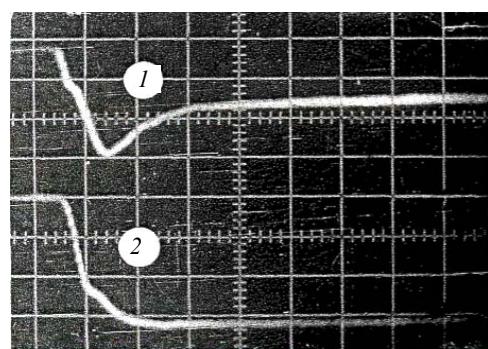
Значение проводимости образца после воздействия импульса напряжения зависит от амплитуды импульса напряжения, в результате воздействия которого было получено исходное состояние ВС.



По вертикали: 1 – 2,5 мА/дел., 2 – 2,5 В/дел.

По горизонтали: 25 мкс/дел.

Рис. 5. Осциллограмма импульса сквозного тока при воздействии напряжения одинаковой амплитуды



По вертикали: 1 – 50 мА/дел., 2 – 2,5 В/дел.

По горизонтали: 0,1 мкс/дел.

Рис. 6. Осциллограмма импульса сквозного тока при воздействии напряжения амплитудой  $V > V_{\max}$

Особенности динамических вольт-амперных характеристик и переходных характеристик сквозного тока указывают на то, что кроме состояний с высокой проводимостью и высоким сопротивлением возможны состояния с промежуточной проводимостью (сопротивлением).

Для изучения зависимости амплитуды тока от предшествующего воздействия напряжения на образец последовательно подавались два импульса с амплитудами  $V_1 > V_{\max}$ ,  $V_2 > V_{\max}$ . И значения амплитуды токов сопоставлялись с семейством вольт-амперных характеристик МДМ-структур.

При  $V_1 = V_2 > V_{\max}$  первый и второй импульсы сквозного тока соответствуют кривой на рис. 7. При увеличении амплитуды  $V_1 > V_2$  первый импульс сквозного тока соответствует кривой, а второй импульс – участку. При  $V_1 < V_{\max}$ ,  $V_2 < V_{\max}$  амплитуда второго импульса сквозного тока не зависит от первого импульса напряжения.

Как указывается в [10], такие свойства МДМ-структур, как эмиссия электронов в вакуум, вольт-амперная характеристика сквозного тока, определяются свойствами квантовых точек и нанозазора между квантовыми точками (Si), возникающими в процессе электрической формовки, путем диссоциации слабых связей Si-OH Si-H, имеющихся в пленках  $\text{SiO}_2$ , и участком верхнего электрода (M) (рис. 8) в условиях сильного электрического поля, напряженность составляет  $10^8$ – $10^9$  В/м при напряжении 10–15 В между электродами МДМ-структур.

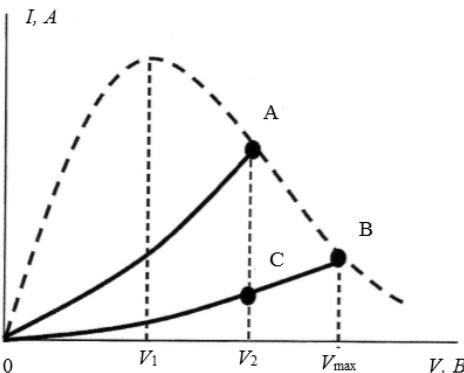


Рис. 7. Зависимость динамической вольт-амперной характеристики сквозного тока от амплитуды предшествующего импульса напряжения

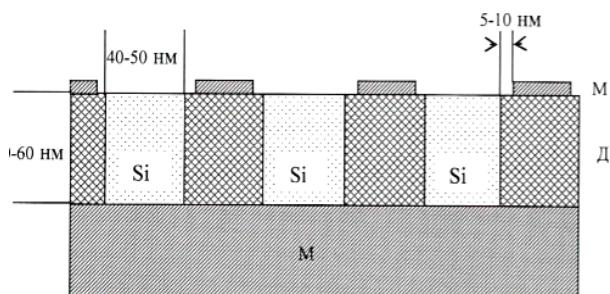


Рис. 8. Модель структуры МДМ, образующейся в результате электрической формовки [11–15]

Полученные результаты позволяют углубить знания в области процессов переключения в МДМ

структур, в том числе использованных для создания мемристорных элементов памяти. Установлено, что переключение высокого сопротивления в высокую проводимость осуществляется за более длительный промежуток времени по сравнению с переключением из высокой проводимости в высокое сопротивление. Между состояниями высокого сопротивления и высокой проводимости возможно состояние с промежуточной проводимостью.

### Литература

1. Дирнлей Дж. Электрические явления в аморфных пленках оксидов / Дж. Дирнлей, А. Стоунхэм, Д. Могран // УФН. – 1974. – Т. 112, вып. 1. – С. 83–128.
2. Баранов А.В. Эмиссия горячих электронов из тонкопленочной системы Al– $\text{Si}_3\text{N}_4$ –Al / А.В. Баранов, Г.А. Воробьев, П.Е. Троян и др. // Изв. АН СССР. Сер.: физическая. – 1974. – Т. 38, № 2. – С. 291–295.
3. Ray A.K. A critical review of the observed electrical properties MIM devices showing VCNR / A.K. Ray, C.A. Horgan // Int. J. Electronics. – 1984. – Vol. 57, № 1. – P. 1–78.
4. Мордвинцев В.М. Возможный механизм формирования N-образной вольт-амперной характеристики МПМ диода / В.М. Мордвинцев, В.Л. Левин. – ЖТФ. – 1994. – Т. 64, вып. 12. – С. 88–150.
5. Воробьев Г.А. Электронные процессы в тонкопленочных структурах металл–диэлектрик–металл / Г.А. Воробьев, П.Е. Троян. – Томск, 2007. – 180 с.
6. Pagnia H. Bistable switching in electroformed metal-insulator-metal devices / H. Pagnia, N. Sotnik // Phys. stat. sol (a). – 1988. – Vol. 108, № 11. – P. 11–65.
7. Троян П.Е., Каранский В.В. Электрическая формовка и пробой тонкопленочных структур металл–диэлектрик–металл // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 152–154.
8. Троян П.Е. Электрическая формовка тонкопленочных структур металл–диэлектрик–металл в сильных электрических полях. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. – 178 с.
9. Антоненко П.И. Особенности работы матрицы ненакаливаемых тонкопленочных эмиттеров в импульсном режиме / П.И. Антоненко, Г.А. Воробьев, В.И. Зеленский, П.Е. Троян и др. // Электронная техника. – Сер. 4: Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1988. – В. 3 (112). – С. 25–26.
10. Троян П.Е. Эмиссионные структуры на основе формованных тонкопленочных систем / П.Е. Троян, В.И. Зеленский // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 4. – С. 9–11.
11. Гапоненко В.М. О природе образования формованных каналов в тонкопленочных МДМ-системах / В.М. Гапоненко // Изв. вузов. Физика. – 1992. – № 5. – С. 115–120.
12. Троян П.Е. Электрическая формовка тонкопленочных МДМ-систем // Изв. вузов. Физика. – 1996. – Т. 39, № 5. – С. 55–60.
13. Barriac C. Study of the electrical properties of Al– $\text{Al}_2\text{O}_3$ -metal structures / C. Barriac, P. Pinard, and F. Daroine // Phys. stat. sol (a). – 1974. – Vol. 34, № 1. – P. 621–633.
14. Гапоненко В.М. Влияние напряжения на деградацию формованных каналов в тонкопленочных МДМ-катодах // Изв. вузов. Физика. – 1992. – № 10. – С. 44–47.
15. Воробьев Г.А. Формовка системы металл–диэлектрик–металл и ее пробой / Г.А. Воробьев, В.И. Зеленский // Радиотехника и электроника. – 1989. – Т. 34, № 6. – С. 1312–1315.

**Троян Павел Ефимович**

Д-р техн. наук, профессор каф.  
физической электроники (ФЭ) ТУСУРа  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-110-22-11  
Эл. почта: tpe@tusur.ru

**Зеленский Владимир Иванович**

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. физики  
и общетехнических дисциплин  
Югорского государственного университета  
Чехова ул., д. 16, г. Ханты-Мансийск, Россия, 628012  
Тел.: +7 (347-6) 35-75-92  
E-mail: w\_selenski@ugrasu.ru

**Каранский Виталий Владиславович**

Аспирант каф. ФЭ ТУСУРа  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-923-440-72-78  
Эл. почта: karanskii\_vitali@mail.ru

Troyan P.E., Zelensky V.I., Karansky V.V.

**Impulse characteristics nanostructures  
of metal-dielectric-metal**

Pulsed characteristics of a thin-film nanostructure based on a silicon oxynitride film point out memristor properties of the nanostructure, are considered. The current-voltage characteristics and switching of structures from a state of high resistance to a state of high conductivity in a pulsed mode are investigated. It is established that the switching of high resistance to high conductivity is carried out for a longer period of time compared with switching from high conductivity to high resistance. Between states of high resistance and high conductivity, a state with intermediate conductivity is possible.

**Keywords:** thin-film nanostructure, metal-insulator-metal, impulse response, memristor properties.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-4-17-20

*References*

1. Dirnlei Dj., Stounhem A., Mogran D. Elektricheskie yavleniya v amorfnyih plenkah oksidov. *UFN*, 1974, T. 112, VIP. 1, pp. 83–128 (in Russ.).
2. Baranov A.V., Vorobev G.A., Troyan P.E. i dr. Emisiya goryachih elektronov iz tonkoplenochnoi sistemi Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–Al. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Fizicheskaya*, 1974, T. 38, no. 2, pp. 291–295 (in Russ.).
3. Ray A.K., Hogarth C.A. A critical review of the observed electrical properties MIM devices showing VCNR. *Int. J. Electronics*, 1984, vol. 57, no. 1, pp. 1–78.
4. Mordvincev V.M., Levin V.L. Vozmozhni mehanizm formirovaniya N-obraznoi volt-ampernoj harakteristiki MPM diode. *JTF*, 1994, T. 64, vol. 12, pp. 88–150 (in Russ.).
5. Vorobev G.A., Troyan P.E. Elektronnije processi v tonkoplenochnih strukturah metal-dielektrik-metall, *Monografiya*, Tomsk, 2007. 180 p.
6. Pagnia H., Sotnik N. Bistable switching in electro-formed metal- insulator-metal devices. *Phis. stat. sol. (a)*, 1988, vol. 108, no. 11. pp. 11–65 (in Russ.).

7. Troyan P.E., Karanskii V.V. Elektricheskaya formovka i proboi tonkoplenochnih struktur metall-dielektrik-metal. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, T. 20, no. 3, pp. 152–154 (in Russ.).

8. Troyan P.E. Elektricheskaya formovka tonkoplenochnih struktur metall – dielektrik – metall v silnih elektricheskikh polyah. *Tomsk, izd-vo Tomskogo universiteta*, 2003. 178 p. (in Russ.).

9. Vorobev G.A., Zelenskii V.I., Troyan P.E., Antonenko P.I. i dr. Osobennosti raboti matrici nenakalivaemih tonkople nochnih emitterov v impulsnom rejime. *Elektronnaya tekhnika (Elektrovakuumnie i gazorazryadnie pribori)*, 1988, vol. 3, 112, pp. 25–26 (in Russ.).

10. Troyan P.E., Zelenskii V.I. Emissionnie strukturi na osnove formovannih tonkoplenochnih system. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 4, pp. 9–11 (in Russ.).

11. Gaponenko V.M. O prirode obrazovaniya formovannih kanalov v tonkoplenochnih MDM sistemah. *Izv. Vuzov. Fizika*, 1992, no. 5, pp. 115–120 (in Russ.).

12. Troyan P.E. Elektricheskaya formovka tonkoplenochnih MDM system. *Izv. Vuzov. Fizika*, 1996, T. 39, no. 5, pp. 55–60 (in Russ.).

13. Barriac C., Pinard P., Daroine F. Study of the electrical properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-metal structures. *Phis, state, sol (a)*, 1974, vol. 34, no. 1, pp. 621–633.

14. Gaponenko V.M. Vliyanie napryajeniya na degradaciyu formovannih kanalov v tonkoplenochnih MDM-katodah. *Izv. vuzov. Fizika*, 1992, no. 10, pp. 44–47 (in Russ.).

15. Vorobev G.A., Zelenskii V.I. Formovka sistemi metall-dielektrik-metall i ee proboi. *Radiotekhnika i elektronika*, 1989, T. 34, no. 6, pp. 1312–1315 (in Russ.).

**Pavel E. Troyan**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Physical Electronics,  
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-110-22-11  
Email: tpe@tusur.ru

**Vladimir I. Zelensky**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor of the Department of Physics and General Technical Disciplines,  
Ugra State University  
16, Chekhov st., Khanty-Mansiysk, Russia, 628012  
Phone: +7 (347-6) 35 75 92  
Email: w\_selenski@ugrasu.ru

**Vitaly V. Karansky**

PhD student, Department of Physical Electronics,  
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-923-440-72-78